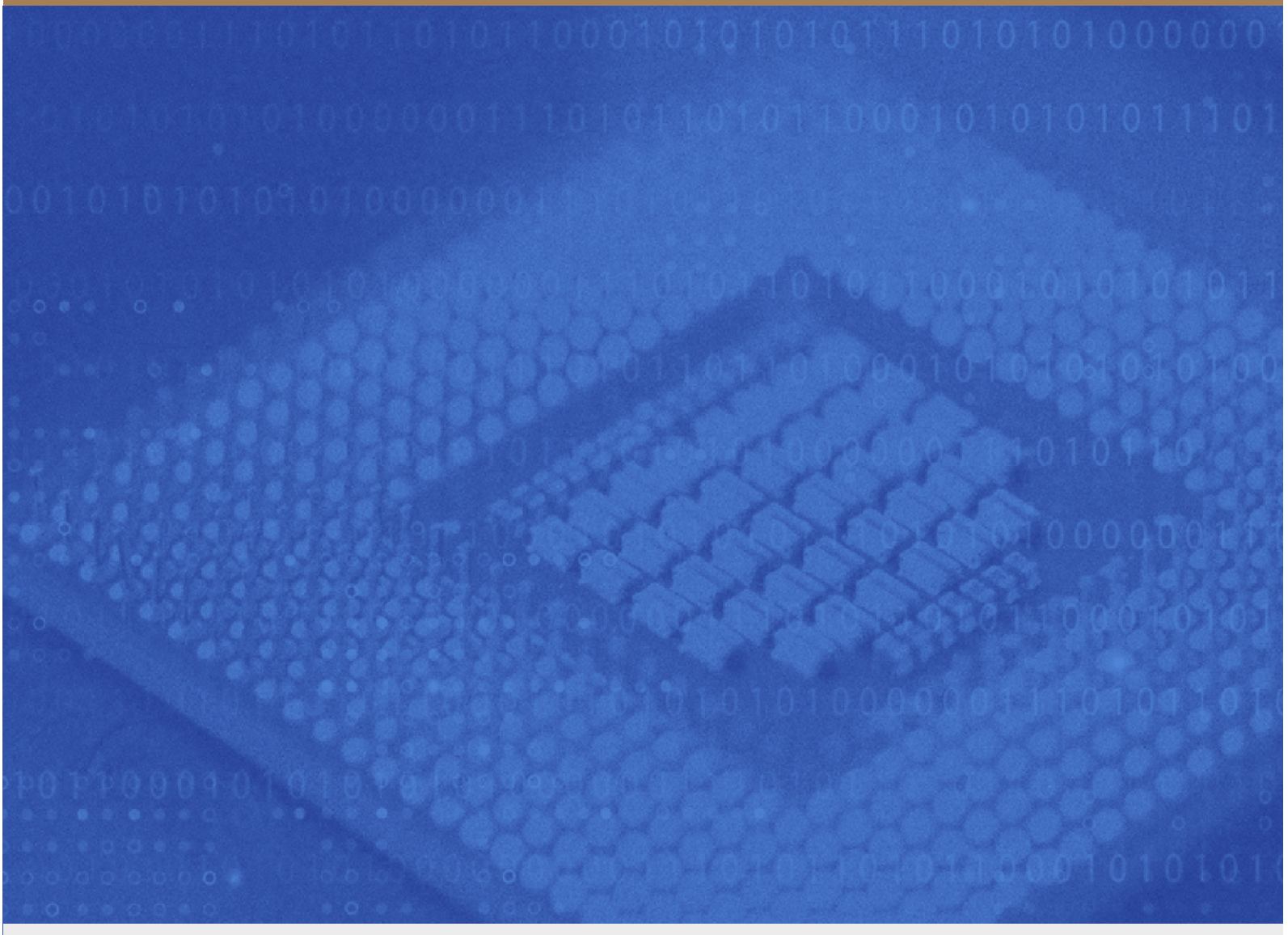
EDA Conference

23 октября 2026 года
БГУИР, г. Минск, Республика Беларусь
edaconf.bsuir.by

КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ



Министерство образования Республики Беларусь

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

(EDA Conference 2026)

Сборник научных трудов
Международной научно-практической конференции

(Республика Беларусь, г. Минск, 23 октября 2026 года)

Минск БГУИР 2026

УДК [004.94+621.38](082)
ББК 32.973.3я43+32.85я43
К63

Редакционная коллегия:
В. Р. Стемпицкий, Л. А. Шичко, И. Ю. Ловшенко, В. А. Лабунов,
И. И. Абрамов, М. С. Баранова, Н. В. Гапоненко, Д. Б. Мигас,
Е. В. Бакунова, Д. Ч. Гвоздовский, П. Э. Новиков

К63 **Компьютерное** проектирование в электронике = Electronic Design Automation : сб. научных трудов Междунар. науч.-практ. конф. (Республика Беларусь, г. Минск, 23 октября 2026 года) / редкол. : В. Р. Стемпицкий [и др.]. – Минск : БГУИР, 2026. – 320 с.
ISBN 978-985-543-913-5.

Содержит результаты научных исследований и разработок в области электроники, наноматериалов и нанотехнологий, разноуровневого компьютерного моделирования.

УДК [004.94+621.38](082)
ББК 32.973.3я43+32.85я43

ISBN 978-985-543-913-5

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2026

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

БОГУШ Вадим Анатольевич	председатель оргкомитета, д-р физ.-мат. наук, профессор, ректор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники;
БУЙНЕВИЧ Андрей Сергеевич	сопредседатель оргкомитета, генеральный директор ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»;
МЕЛИКЯН Вазген Шаваршович	сопредседатель оргкомитета, д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент НАН РА, директор учебного департамента ЗАО «Синопсис Армения», заведующий кафедрой «Микроэлектронные схемы и системы», Национальный политехнический университет Армении
СТЕМПИЦКИЙ Виктор Романович	заместитель председателя оргкомитета, канд. техн. наук, доцент, проректор по научной работе Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники;
ШИЧКО Людмила Александровна	заместитель начальника научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники;
ЛОВШЕНКО Иван Юрьевич	заведующий научно-исследовательской лабораторией «Компьютерное проектирование микро- и наноэлектронных систем», Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники;
ВОЛЧЁК Владислав Сергеевич	канд. техн. наук, старший научный сотрудник НИЛ «Компьютерное проектирование микро- и наноэлектронных систем», Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники;
ПЕРЕВЕРЗЕВ Алексей Леонидович	д-р техн. наук, профессор РАН, проректор по инновационному развитию, директор Института микроприборов и систем управления, Национальный исследовательский университет «МИЭТ».

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

ЛАБУНОВ Владимир Архипович	председатель программного комитета, д-р техн. наук, профессор, академик НАН Беларуси, иностранный член РАН, научный руководитель научно-исследовательской лаборатории «Интегрированные микро- и наносистемы», Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники;
АБРАМОВ Игорь Иванович	д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры микро- и наноэлектроники, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Физика приборов микро- и наноэлектроники», Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники;
БАРАНОВА Мария Сергеевна	канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник НИЛ «Компьютерное проектирование микро- и наноэлектронных систем», Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники;
БОНДАРЕНКО Анна Витальевна	д-р техн. наук, доцент, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Прикладная плазмоника», Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники;
ГАПОНЕНКО Николай Васильевич	д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Нанофотоника», Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники;
ГУСЕЙНОВА Сума Сакит	канд. физ.-мат. наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории «Физика и техника высоких напряжений», Институт физики Национальной академии наук Азербайджана;
КАСУМОВ Вагиф	д-р техн. наук, профессор, декан факультета информационно-компьютерных технологий, Бакинский инженерный университет;
КИСТАНОВ Андрей Александрович	д-р физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории «Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях», Уфимский университет науки и технологий;
КОРЗНИКОВА Елена Александровна	д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией «Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях», Уфимский университет науки и технологий;

ЛАЗАРУК Сергей Константинович	д-р физ.-мат. наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Интегрированные микро- и наносистемы», Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники;
ЛИ Кан	профессор факультета интегральных схем, Сидяньский университет;
МИГАС Дмитрий Борисович	д-р физ.-мат. наук, доцент, профессор, заведующий кафедрой микро- и наноэлектроники, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники;
НГО Куанг Минь	канд. физ.-мат. наук, доцент, Ханойский университет наук и технологий, Вьетнамская академия наук и технологий.

ГРУППА ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ

БАКУНОВА Елена Валерьевна	начальник отдела маркетинга и научных коммуникаций, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники;
БЕЛАН Светлана Васильевна	ведущий маркетолог отдела маркетинга и научных коммуникаций, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники;
ГВОЗДОВСКИЙ Дмитрий Чеславович	научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Компьютерное проектирование микро- и наноэлектронных систем», Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники;
КОРСАК Кирилл Витальевич	младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Компьютерное проектирование микро- и наноэлектронных систем», Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники;
ЛИХАЧЕВ Артем Андреевич	инженер-электроник научно-исследовательской лаборатории «Компьютерное проектирование микро- и наноэлектронных систем», Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники;
ЛУКША Ульяна Ярославовна	дизайнер отдела маркетинга и научных коммуникаций, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники;
НОВИКОВ Павел Эдуардович	младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Компьютерное проектирование микро- и наноэлектронных систем», Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники;
СИТНИКОВА Анастасия Олеговна	переводчик отдела маркетинга и научных коммуникаций, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.

ПАРТНЕР

ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», холдинговая компания с 55-летним опытом разработки и производства интегральных схем, дискретных полупроводниковых приборов, систем отображения информации, электронной и медицинской техники. Комплекс предприятий и конструкторских бюро обеспечивает полный цикл создания продукции от стадии проектирования до серийного производства. Холдинг выпускает более 3500 типов интегральных схем и полупроводниковых приборов, 200 типов жидкокристаллических дисплеев и модулей, 150 типов электронного оборудования для медицины и мониторинга здоровья, банковской сферы, торговли, сельского хозяйства и т. д.

«ИНТЕГРАЛ» разрабатывает и производит новые микроэлектронные компоненты для отечественных и зарубежных производителей бытовой и промышленной электроники, а также специализированное оборудование, работающее в экстремальных условиях. Продукция холдинга успешно применяется в космической электронике, в устройствах с высокими требованиями к надежности, в бытовой технике, средствах связи и телекоммуникаций, промышленной автоматике, светодиодной аппаратуре управления, электронных системах идентификации и доступа, платежных системах, автомобильной электронике и др.

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1. Моделирование в электронике: материалы, приборы, системы

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМОЗВУКОВОЙ СВАРКИ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ НА ПОДЛОЖКАХ ENEPIG СВЧ ПРИБОРОВ
Петухов И.Б. 15

ПЕРВОПРИНЦИПНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ $ZnVN_2$: ОТ ОБЪЕМНОГО МАТЕРИАЛА ДО МОНОСЛОЯ
Устюжанина С.В., Кистанов А.А. 19

РАЗРАБОТКА КОНДЕНСАТОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $(Ba,Sr,Ca)TiO_3$
Хрусталев А.Н., Базарова В.Е., Арбанас Л.А., Верхова Е.Д., Акиньшин И.Д., Серова Е.К., Холодкова А.А., Грабеклис С.К., Бондарев С.В., Смирнов А.В. 23

ДОПИРОВАНИЕ ПЕРОВСКИТА МОНОЭТАНОЛАМИНОМ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИХ ЯЧЕЕК НА ЕГО ОСНОВЕ
Тучковский А.К., Кашко И.А., Лабунов В.А. 26

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДАМИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
Козик Е.С., Корчагина С.А., Королева А.В. 30

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЛАГОСОДЕРЖАЩИХ ЭКРАНИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ
Сухоцкий В.В., Пухир Г.А., Насонова Н.В. 34

ФОРМИРОВАНИЕ АНТИОТРАЖАЮЩИХ СЛОЕВ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК
Ковальчук Н.Г., Дронина Е.А., Прищепа С.Л., Томашевич Л.П., Петров А.В., Каланда Н.А., Лазарук С.К. 38

РАЗМЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ СТЕКЛОВАНИИ НАНОЧАСТИЦ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА
Баглов А.В., Алексеенко А.А., Ларькин А.В., Хорошко Л.С. 42

РАЗРАБОТКА МИКРОВОЛНОВОГО КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ С-ДИАПАЗОНА
Базарова В.Е., Акиньшин И.Д., Хрусталев А.Н., Арбанас Л.А., Верхова Е.Д., Смирнова А.А, Серова Е.К., Смирнов А.В. 44

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛООТВОДЯЩЕГО КОРПУСА ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ
Новокшенов А.Д., Карчевская А.С., Матвеева А.И., Боровков А.И., Щербаков С.С., Подгайская Д.А., Мендель А.В. 47

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗ ПЕРВЫХ ПРИНЦИПОВ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ АЛМАЗ <111>/ ВЕРТИКАЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ГРАФЕН
Мищенко В.Н., Лабунов В.А. 51

СРАВНЕНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ, ФОРМИРУЕМЫХ ПРИ ПОСТОБРАБОТКЕ СХЕМАМИ НА БАЗЕ МНОГОКАНАЛЬНОГО СИГНАТУРНОГО АНАЛИЗАТОРА И SHA-1
Петровский Д.А., Иванюк А.А. 55

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОСЛОЙНОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МИКРОАКТУАТОРА ПО ЗАДАННЫМ ЧАСТОТАМ
Авдонюшкин Д.В., Новокшенов А.Д. 59

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ И ОБМЕННОГО СМЕЩЕНИЯ В НАНОЧАСТИЦАХ СО СТРУКТУРОЙ «ЯДРО–ОБОЛОЧКА» Co/CoO, НАНЕСЕННЫХ НА ГРАФЕН
Назаренко Е.С., Данилюк А.Л., Прищепа С.Л. 62

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ОХЛАЖДЕНИЯ НА НАДЁЖНОСТЬ КМОП-ПЛИС СЕМЕЙСТВА KINTEX-7 НА ОСНОВЕ ТЕПЛОВОЙ МОДЕЛИ И УРАВНЕНИЯ АРРЕНИУСА
Яцкевич Я.С. 66

0D МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДУКТИВНО-СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМЫ ГЕКСАФТОРЭТАНА В РЕАКТОРЕ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ
Корякова Е.Е., Ефремов А.М. 69

ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ УСИЛИТЕЛЯ X-ДИАПАЗОНА
Журавлёв В.И., Наумович Н.М., Стежко И.К., Колбун В.С. 73

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВЕРИФИКАЦИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ МИКРОБОЛОМЕТРИЧЕСКОГО ПИКСЕЛЯ
Левчук Д.С., Соловьёв Я.А., Видрицкий А.Э., Стемпицкий В.Р. 77

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОРПУСИРОВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ
Видрицкий А.Э., Савко А.И., Левчук Д.С., Ланин В.Л. 81

СПЕКТР ТОКА В ТОНКОЙ ПЛЕНКЕ ПОЛУМЕТАЛЛА ВЕЙЛЯ
Рышкевич А.А., Данилюк А.Л. 85

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АНАЛИТИЧЕСКИХ И СТАТИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ, РЕАЛИЗОВАННЫХ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ
Курленко А.Д., Громыко В.А., Ловшенко И.Ю., Биран С.А. 89

DESIGN OF 2.4–2.5 GHZ LOW-NOISE AMPLIFIER WITH DIGITAL GAIN CONTROL IN 28 NM FD-SOI TECHNOLOGY
Chertoritskii I.G., Bukhtoyarov S.E. 91

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МЕДНЫХ СПЛАВОВ
Козик Е.С., Хрущов М.М., Бакшаев И.С., Горшков Н.М., Васильев П.А., Рожнов Н.С., Чибиров Т.Д. 96

SPECIFICS OF PARAMETRIC MEASUREMENT OF SEMICONDUCTOR DEVICES USING VERILOG-A
Filimonova A.F. 100

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ БИСТАБИЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, РЕАЛИЗОВАННЫХ НА ПЛИС
Кайкы М.Н., Иванюк А.А. 103

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОМПАКТНОГО РЕКОНФИГУРИРУЕМОГО *PUF*-КОНТРОЛЛЕРА
Трубач К.И., Иванюк А.А. 107

Q-БИТНАЯ ФИЗИЧЕСКИ НЕКЛОНИРУЕМАЯ ФУНКЦИЯ ТИПА КОНФИГУРИРУЕМЫЙ КОЛЬЦЕВОЙ ОСЦИЛЛЯТОР И ОЦЕНКА ЕЕ ХАРАКТЕРИСТИК
Бурко Л.А., Иванюк А.А. 111

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАДЁЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОНИКИ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ ВХОДНОГО КОНТРОЛЯ
Боровиков С.М., Будник А.В., Русак И.В. 115

MODELING OF HYDROGEN ION GENERATION IN THE METALL-GRAPHENE NANOSTRUCTURE CONTAINING ORGANIC COMPLEXES
Simonenko D.A., Soe E.T., Hein C.L., Radziuk D.V. 119

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ АДДИТИВНЫМИ МЕТОДАМИ (3D-ПЕЧАТЬ)
Ястребинская Д.В., Гончарова Е.А., Лейченко В.И., Бачев П.А., Солонков А.А., Козик Е.С. 123

КРИТИЧЕСКИЕ СОСТОЯНИЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ СЛОИСТЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР СВЕРХПРОВОДНИК/ФЕРРОМАГНЕТИК
Кушнир В.Н., Прищепа С.Л. 127

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ В ЗАДАННОЙ ПОЛОСЕ ЧАСТОТ
Зайко Е.И., Насонова Н.В. 131

SECURITY-BY-DESIGN PRINCIPLES FOR EMBEDDED AND IoT SYSTEMS
Badshahzoi F., Mailykhanova B.A. 135

ВЛИЯНИЕ ТОПОЛОГИИ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ: АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР
Матёкубов У.К., Мурадов М.М., Улашов С.Р. 139

АППАРАТНО-ПРОГРАММНАЯ ПЛАТФОРМА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ИМПЛАНТИРУЕМЫХ СЕНСОРОВ
Осипов А.Н., Урбанович С.П., Мороз С.А., Ронишенко Б.В. 143

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МАРШРУТА ФОРМИРОВАНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ПРИБОРНЫХ СТРУКТУР С ПРОЕКТНЫМИ НОРМАМИ 90 НМ
Новиков Ф.П., Пашкевич В.Э., Ветошкин В.В., Якуш В.С., Волчёк В.С., Ловшенко И.Ю. 147

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИИ УПРУГОГО ПОДВЕСА ДАТЧИКА УГЛА НАКЛОНА С ЭЛЛИПТИЧЕСКИМ ПОПЕРЕЧНЫМ СЕЧЕНИЕМ
Корсак К.В., Новиков П.Э., Шляев В.А., Баранова М.С. 149

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИДЕНТИФИЦИРУЕМОСТИ ПАРАМЕТРОВ КОМПАКТНЫХ МОДЕЛЕЙ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ГАФНИЯ
Новиков П.Э., Стемпицкий В.Р. 151

ПОДХОДЫ К МНОГОУРОВНЕВОМУ КОМПЬЮТЕРНОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ ТРАНЗИСТОРОВ С КРУГОВЫМ ЗАТВОРОМ С HIGH-K ДИЭЛЕКТРИКАМИ
Корсак К.В., Новиков Ф.П. 153

СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА АЛЛОТРОПНЫХ ФОРМ ОКСИДА ГАЛЛИЯ В РАМКАХ AB INITIO МОДЕЛИРОВАНИЯ
Усенко Е.Е., Булавко К.И., Гвоздовский Д.Ч. 156

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ ОБРАЗОВАНИЯ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ ТИПА «ВАКАНСИЯ» КОНСТРУКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИБОРНЫХ СТРУКТУР МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ, СФОРМИРОВАННЫХ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ
Булавко К.И., Усенко Е.Е., Пашкевич В.Э., Гвоздовский Д.Ч. 160

АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛА БАЗ ДАННЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ В СОВРЕМЕННЫХ ПЛАТФОРМАХ ДЛЯ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
Чураков А.В., Камлач П.В., Онгарбаева А.И. 162

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОРИСТОГО ОКСИДА ВОЛЬФРАМА С ТЕРМИТНОЙ СТРУКТУРОЙ НА УДЕЛЬНУЮ ВНУТРИПОРОВУЮ ПОВЕРХНОСТЬ
Лазарук С.К., Дудич В.В., Томашевич Л.П., Иванюта С.М., Ионов М.И, Духовников А.В. 166

ДЕФЕКТНО-ПРИМЕСНЫЕ КОМПЛЕКСЫ В МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПЕРОВСКИТНЫХ ТИТАНАТАХ
Хорошко Л.С., Баглов А.В. 170

АНАЛИЗ МОРФОЛОГИИ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ ПУТЕМ ПОВТОРНОГО АНОДИРОВАНИЯ В ЭЛЕТКРОЛИТЕ НА ОСНОВЕ ЛИМОННОЙ КИСЛОТЫ
Гутковская А.А., Овчинникова Д.А., Биран С.А., Короткевич А.В. 172

ОБЗОР МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ И ТРЕБОВАНИЯ К ПОСТРОЕНИЮ СЕТКИ ДЛЯ ЗАДАЧ ОХЛАЖДЕНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ
Капельян С.В., Решетник П.В. Пискун Г.А. 176

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НАГНЕТАТЕЛЕЙ ВОЗДУХА В SOLIDWORKS FLOW SIMULATION
Яромченко А.Г., Пискун Г.А. 181

ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО β-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАВИННЫХ СВЕТОДИОДОВ НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО КРЕМНИЯ
Клюцкий А.Ю., Лазарук С.К., Долбик А.В., Стома С.С., Дудич В.В., Лабунов В.А. 185

SIMULATION OF THE FOWLER–NORDHEIM TUNNELING CURRENT THROUGH THE GATE DIELECTRIC OF AlGaN/AlN/GaN MIS-HEMT
Volcheck V., Novikau F., Pashkevich V., Hvazdouski D., Hulikava K. 188

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК В ПРОЦЕССЕ АНОДИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЯ
Яковцева В.А., Шиманович Д.Л., Гусинский А.В. 191

КОМПАКТНАЯ (ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ) МОДЕЛЬ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА С ИЗОЛИРОВАННЫМ ЗАТВОРОМ
Нгуен Чонг Тхань, Стемпицкий В.Р. 191

4H-SiC ТРАНШЕЙНЫЙ БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР С ИЗОЛИРОВАННЫМ ЗАТВОРОМ С НИЗКИМ ПАДЕНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ
Нгуен Чонг Тхань, Ветошкин В.В., Якуш В.С. 191

Секция 2. Автоматизация проектирования электронных систем

ПРИМЕНЕНИЕ ГАУССОВСКОЙ РЕГРЕССИИ ДЛЯ БЫСТРОЙ ОЦЕНКИ ВХОДНОГО ИМПЕДАНСА МИКРОПОЛОСКОВОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ
Кизименко В.В., Наумович Н.М. 202

ОРГАНИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСНОГО ВИЗУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ ВЫПОЛНЕНИИ ПРОЦЕДУР ОПТИМИЗАЦИИ В СИСТЕМЕ ЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТРУКТУРНЫХ ОПИСАНИЙ ЦИФРОВЫХ СХЕМ
Логинова И.П. 204

DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR MONITORING INFORMATION SECURITY OF SOCIAL NETWORKS
Tagangylyjov I.G., Artyklyyev K.S. 210

АЛГОРИТМ ВНЕДРЕНИЯ ВОДЯНЫХ ЗНАКОВ В VHDL-ОПИСАНИЯ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ, РЕАЛИЗУЕМЫХ НА FPGA
Лавренова А.С., Иванюк А.А. 212

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ОБНАРУЖЕНИЯ ФИШИНГОВЫХ URL НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ
Свиридчук И.Л., Малькевич К.Д. 216

ДВУХЭТАПНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ УПРУГОЙ ПЛАСТИНЫ С ПОМОЩЬЮ CNN И GAN
Матвеева А.И., Новокшенов А.Д., Карчевская А.С., Боровков А.И., Щербаков С.С., Подгайская Д.А., Мендель А.В. 220

АППАРАТНО-ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КЛАССИФИКАТОРА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ LST-1 И СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЕГО ПРИЗНАКОВОГО ПРОСТРАНСТВА
Тондель Д.А., Вашкевич М.И. 223

THE ROLE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN MALICIOUS CODE ANALYSIS
Artyklyyev K.S., Tagangylyjov I.G. 228

ТЕХНОЛОГИЯ МОДИФИКАЦИИ ДЕТАЛЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ НА 3Д ПРИНТЕРЕ
Юшко Д.Е. Шахлевич Г.М. 231

UNSUPERVISED ANOMALY DETECTION IN ENCRYPTED TLS TRAFFIC WITHOUT DEEP PACKET INSPECTION
Orazdurdyyeva G. 235

IoT-BASED INTELLIGENT SYSTEM FOR PROTECTING AGRICULTURAL CROPLANDS FROM LIVESTOCK AND VERTEBRATE INTRUSIONS
Sadikov M.A. 240

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СИНТЕЗ ГИБРИДНОГО ВЕЙВЛЕТНО-НЕЙРОСЕТЕВОГО ДЕТЕКТОРА ОПАСНЫХ ВЫБРОСОВ ДЛЯ РЕСУРСНО-ОГРАНИЧЕННОГО СЕНСОРНОГО УЗЛА
Писецкий Ю.В., Давронбеков Д.А. 247

FORMAL MODEL OF EDGE–FOG–CLOUD-BASED DATA DISTRIBUTION
Klychev A. 251

РАЗДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ПРИ МУЛЬТИАГЕНТНОМ СИНТЕЗЕ СХЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ
Курлюк Е.А., Ларченко Н.А., Давыдов М.В. 255

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ПРОФИЛЕЙ УЯЗВИМОСТИ ОБЪЕКТОВ ЗАЩИТЫ НА БАЗЕ РЕТРОСПЕКТИВНЫХ ДАННЫХ
Саитов И.А., Кунин Н.Т. 259

ОБНАРУЖЕНИЕ СИНТЕЗИРОВАННОЙ РЕЧИ НА ОСНОВЕ МЕЛ-КЕПСТРАЛЬНЫХ ПРИЗНАКОВ И УЛЬТРАЛЕГКОВЕСНОЙ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ
Малькевич К.Д., Свиридчук И.Л. 265

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ВЫБОР ПРОГНОЗНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ МНОГОЗОННЫХ IoT-СИСТЕМ ТЕПЛОВОГО УПРАВЛЕНИЯ
Майлыханова Б.А., Кашаганова Г.Б. 269

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ
Бекиева М. 273

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ СЕТЕВЫХ АТАК В IoT-СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ LIGHTGBM
Якунин А.А., Майлыханова Б.А. 278

DESIGN AND OPTIMIZATION OF A LIGHTWEIGHT MACHINE LEARNING ALGORITHM FOR REAL-TIME ANOMALY DETECTION AND FORECASTING ON RESOURCE-CONSTRAINED EDGE SENSOR SYSTEMS
Pulatov Sh., Abdualimov F. 282

DESIGN OF A RESOURCE-CONSTRAINED IoT SENSOR NODE ARCHITECTURE WITH FAULT-TOLERANT TELEMETRY FOR ENVIRONMENTAL MONITORING SYSTEMS
Pulatov Sh., Abdualimov F. 285

MACHINE LEARNING METHODS USED FOR PROGNOSING FAILURES IN HYBRID ELECTRICITY SUPPLY SOURCES OF TELECOMMUNICATION INFRASTRUCTURE
Muradov M. 288

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ СЕТЕЙ СОТОВОЙ СВЯЗИ СТАНДАРТА LTE
Пулатова Ш.У., Узакбаев Е.О., Шавкатов Ж.Ж. 292

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ Ab INITIO РАСЧЕТОВ ЗОННОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ДАТАСЕТОВ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ
Баглов А.В., Хорошко Л.С. 296

АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ВИРТУАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРОЙ НА БАЗЕ VMMANAGER С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ANSIBLE
Стрельцов А.Д., Пискун Г.А. 300

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ БАЗЫ ДАННЫХ IMEI-КОДОВ МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ
Давронбеков Д.А., Исроилов Ж.Д. 306

ADAPTIVE OPTIMIZATION OF RING OSCILLATORS BASED ON PROCESS-CIRCUIT CO-DESIGN
Qisheng Liu, Kang Li..... 310

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРИБОРНЫХ СТРУКТУР МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ
Новиков Ф.П., Лопатко А.И.,Стемпицкий В.Р...... 315

АЛГОРИТМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПОИСКА ИНФОРМАЦИИ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ БАЗАХ ДАННЫХ
Иович Е.А. 317

СЕКЦИЯ 1.
МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОНИКЕ: МАТЕРИАЛЫ, ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ

УДК 621.3.049.776.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМОЗВУКОВОЙ СВАРКИ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ НА ПОДЛОЖКАХ ENEPIG СВЧ ПРИБОРОВ

Петухов И.Б.

ОАО «Планар-СО», Минск, Республика Беларусь, igorpetuchov@mail.ru

Аннотация: разработана математическая модель кинетики диффузии при термозвуковой сварке золотой проволоки диаметром 17,5 мкм на подложку Rogers 6035HTC с покрытием ENEPIG, доказывающая высокую барьерную эффективность 100 нм палладиевого слоя при монтаже межсоединений золотой проволокой термозвуковой сваркой методом «шарик-клин» при температуре 180-200℃. Моделирование в Matlab показало, что ультразвуковая интенсификация обеспечивает формирование прочного соединения.

Ключевые слова: проволочные межсоединения, покрытие ENEPIG, термозвуковая сварка, подложка СВЧ усилителя.

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании изделий СВЧ, в частности усилителей с выходной мощностью до 20 Вт и частотой в диапазоне от 10 до 12 ГГц, требуется учитывать следующие специфические требования:

- выбор подложки для монтажа кристалла усилителя и SMD компонентов;

- выбор метода монтажа компонентов и межсоединений;

- плотный монтаж проволочных межсоединений с контактных площадок кристалла цепей питания;

- тип металлизации зон присоединения проволочного монтажа.

Из многообразия выпускаемых высокочастотных диэлектрических подложек выделяется высокочастотный ламинат на основе фторопласта с керамическим наполнителем Rogers RT 6035HTC для работы в условиях высокой мощности и высоких радиочастот. Материал обладает высокой теплопроводностью 1,44 Вт/м*К, диэлектрической проницаемостью 3,5±0,05 на частоте 10 ГГц и низким углом диэлектрических потерь 0,0013 на частоте 10 ГГц, что гарантирует минимальное затухание сигнала [1]. Благодаря высокой теплопроводности материал быстро рассеивает тепло от греющихся компонентов, например, от GaN кристалла усилителя, смонтированного на припойную пасту подложки.

Технические характеристики подложки Rogers RT 6035HTC позволяют кратковременное тепловое воздействие на материал до 288℃ в течение 20- 60 секунд без ухудшения прочности сцепления медной фольги с подложкой. Температурный диапазон 180-200 ℃ является для подложки безопасным, что позволяет использовать термозвуковую сварку золотой проволоки методом «шарик-клин» [2].

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СБОРКИ

Подложка Rogers RT 6035HTC должна иметь финишное металлическое покрытие, совместимое с монтажом компонентов и обеспечением качественного соединения золотой проволоки. Стандартное покрытие ENIG (иммерсионное золото по подслою никеля) подходит, но толщина слоя золота должна строго контролироваться. Если слой золота на плате слишком толстый, избыток золота может диффундировать в припой Au80Sn20 при монтаже компонентов (в случае его использования), изменяя процентное соотношение припоя, что приводит к увеличению температуры плавления, ухудшив качество соединения компонентов.

Для подложек, на которые монтируются СВЧ-кристаллы и пассивные элементы покрытие ENIG приемлемо, а для зон термозвукового монтажа проволоки используется покрытие ENEPIG, которое является универсальным и самым надежным для СВЧ устройств. Данное покрытие состоит из трех слоев, наносимых поверх медной дорожки:

- никель (Ni) толщиной 3-6 мкм (служит барьерным слоем, предотвращающим диффузию меди);

- палладий (Pd) толщиной 0,05-0,15 мкм (критически важный слой, который защищает никель от коррозии);

- золото (Au) толщиной 0,03-0,05 мкм (сверхтонкий защитный слой от окисления). Палладиевая прослойка исключает появление эффекта «черной площадки» и обеспечивает максимальную

прочность при тесте на отрыв. Таким образом, покрытие является универсальным для обеспечения монтажа на припой Au80Sn20 и монтажа золотой проволоки методом термозвуковой сварки.

Как известно, процесс термозвуковой сварки начинается с процесса формирования шарика на конце золотой проволоки электроискровым оплавлением [3,4]. При этом диаметр формируемых шариков должен строго контролироваться. Выбор диаметра золотой проволоки определяется прежде всего размером контактной площадки, т.к. присоединяемый шарик должен вписываться в размер контактной площадки (рис. 1). Рассмотрим в качестве примера кристалл усилителя QA1009DP ф.Qorvo.

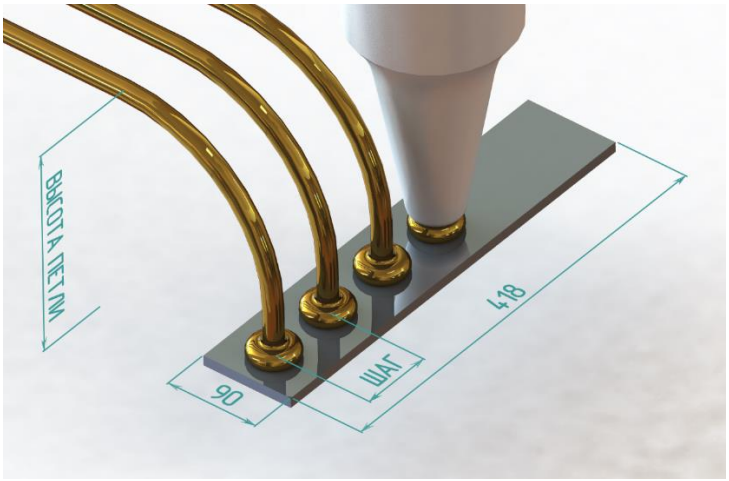


Рисунок 1. Расположение выводов на контактной площадке 418*90 мкм питания кристалла QA1009DP

Из технических характеристик и рекомендаций по монтажу [5] видно, что для межсоединений рекомендуется золотая проволока диаметром 17,5 мкм, а на контактных площадках 5 и 11 (цепь питания кристалла усилителя) расположены по шесть выводов на контактную площадку 418*90 мкм. Стандартным диаметром сформированного(оплавленного) шарика является 1,8-2,0 диаметра проволоки. Значит, диаметр шарика должен быть в пределах 31,5-35 мкм. Под воздействием приложенного усилия и ультразвуковой энергии шарик на контактной площадке сплющивается и исходный диаметр увеличивается на 10-11 мкм. Таким образом, на контактной площадке должны уместиться шесть сварных точек диаметром 46 мкм (под максимальный диаметр исходного шарика) на длине 418 мкм. Дополнительная трудность возникает из необходимости обеспечения зазора(шага) между сварными точками, чтобы сварной капилляр не наступил на соседнюю точку и не смял вывод (рис.1). Нетрудно подсчитать, что при шаге 28 мкм и размере сварной точки 46 мкм, общая цепочка соединений требует 416 мкм. Очевидно, что с учетом погрешности позиционирования современного автомата присоединения выводов ± 2 мкм, необходимо снижать диаметр исходного шарика до 1,8 диаметра проволоки.

Следующим шагом является правильный выбор сварочного капилляра под данный диаметр проволоки 17,5 мкм. Производителей капилляров под термозвуковую сварку методом «шарик-клин» достаточно много, таких как SPT(Швейцария), PECO (Ю.Корея), DO YEE (Сингапур) и другие. Из каталога DO YEE [6] наиболее подходящим капилляром для сборки является UA-2330M-2XL(CBS-OR8-T58-BH152). Данный капилляр длиной 11,1 мм и утоненным торцем 58 мкм предназначен для ультрамелкого шага. При выборе капилляра нужна особая внимательность, поскольку размеры приводятся как в дюймах, так и в микронах.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ПРИСОЕДИНЕНИЯ ЗОЛОТОЙ ПРОВОЛОКИ В MATLAB

Экспериментальные данные, полученные на установке ЭМ-4550 для образования шарика на конце золотой проволоки диаметром 17,5 мкм и режимы присоединения проволоки следующие:

- диаметр образуемых шариков: 30-35 мкм;

- ток разряда: 15-20 мА;

- время разряда: 0,6-1,1 мс.

Режим присоединения первой точки (встык «шариком»), площадки кристалла золотые:

- усилие: 12-18 г;

- мощность ультразвука: 30-45 мВт, частота 133 кГц;

- время ультразвукового импульса: 10-15 мс.

Режим присоединения второй точки («клин»), площадки золотые и ENEPIG:

- усилие: 18-25 г;

- мощность ультразвука: 50-70 мВт, частота 133 кГц;

- время ультразвукового импульса: 12-18 мс.

Когда капилляр автомата ЭМ-4550 прижимает золотую проволоку к контактной площадке платы и подает импульс ультразвука при температуре 180–200 °C, происходит следующее.

Ультразвуковая энергия за время воздействия «перемешивает» атомы соединяемых материалов на стыке. Поскольку верхнее иммерсионное золото на плате очень тонкое (всего 0,03–0,05 мкм), капилляр фактически продавливает его, и золотая проволока вступает в прямой контакт со слоем палладия. Золото и палладий обладают идеальной взаимной растворимостью. Атомы золота из проволоки диффундируют в слой палладия, а атомы палладия — в золото. В результате этой контролируемой диффузии образуется прочный металлический переход Au-Pd (интерметаллид). Именно этот слой обеспечивает высокую прочность клиновой сварки при тесте на отрыв.

В обычном покрытии ENIG (где палладия нет) атомы никеля при нагреве платы во время пайки или термозвуковой сварки стремятся диффундировать сквозь пористое золото на его поверхность. Там никель мгновенно окисляется, создавая пленку оксида никеля, ухудшающая поверхность присоединения.В структуре ENEPIG слой палладия (особенно аморфный палладий с добавлением 3-5% фосфора, используемый ведущими производителями) имеет такую кристаллическую решетку, которая полностью блокирует миграцию атомов никеля. Никель остается запертым в своем нижнем слое и не может испортить зону сварки.

Как известно [7], классическое уравнение Аррениуса описывает диффузию атомов, молекул в зависимости от энергии активации и температуры. Оно предполагает, что для преодоления энергетического барьера Q атому нужна только тепловая энергия- скорость диффузии увеличивается при увеличении температуры. С другой стороны, образуемые дефекты решетки снижают энергетический барьер Q, что также увеличивает скорость диффузии (намного больше, чем увеличение температуры):

$$D = D_0 * e^{\left(\frac{-Q}{R*T}\right)},$$

где D – коэффициент диффузии, D_0 – предэкспоненциальный множитель, Q – энергия активации диффузии, R – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура.

Для моделирования процесса ультразвукового присоединения необходимо использовать модифицированное уравнение, учитывающее снижение барьера энергии активации за счет энергии ультразвука в зоне контакта, приложенного статического усилия к проволоке.

$$D_{us} = D_0 * e^{\left(\frac{-(Q-\Delta Q_{us}(P,U))}{R*T}\right)},$$

где $\Delta Q_{us}(P,U)$ – снижение энергии активации за счет поглощения ультразвука в зоне формируемого контакта. По расчетным данным изменение $\Delta Q_{us}(P,U)$ составляет порядка 15 кДж/моль, зависящее от степени деформации и ее скорости в процессе присоединения.

Экспериментально установлено, что снижение энергии $\Delta Q_{us}(P,U)$ является не только функцией нагрузки и амплитуды ультразвуковых колебаний, но и функцией деформации проволоки и времени, а также технологическое преимущество высокочастотного ультразвука (100 кГц и выше) перед классическим (60 кГц). Это происходит за счет увеличения циклов микросдвигов в единицу времени, чем обеспечивается более интенсивное «акустическое размягчение» кристаллической решетки (эффект Ланженекера). Это позволяет снизить температурный порог термозвуковой сварки со стандартных 230 ℃ до 170-180℃ без потери качества соединения.

Разработанный скрипт Matlab послойной диффузии структуры золото-палладий-никель позволил промоделировать глубину взаимной диффузии золота и палладия, а также оптимальное время присоединения до начала диффузии золота в никель что предотвращает излишнюю деформацию проволоки (рис.2).

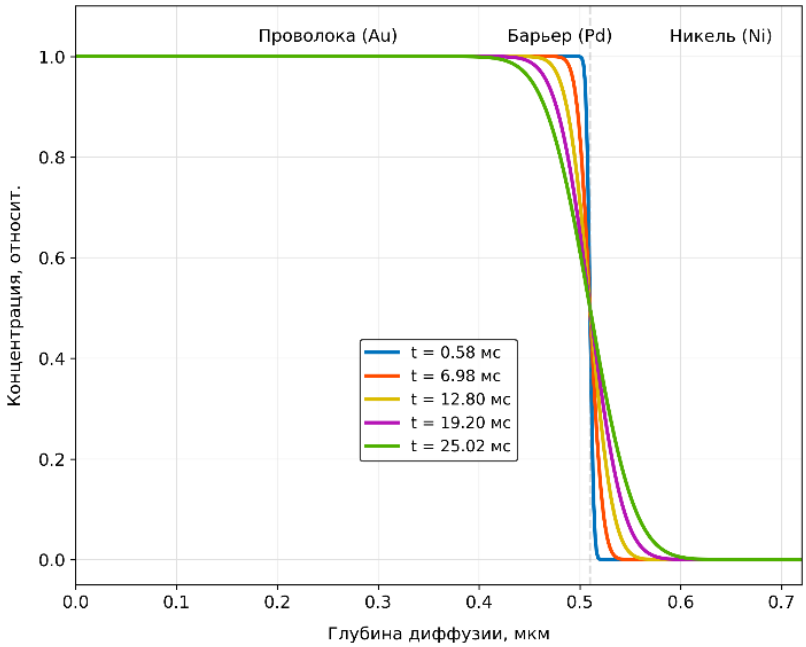


Рисунок 2. Глубина диффузии на границе золото-палладий в зависимости от времени ультразвукового воздействия

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученных расчетных и экспериментальных данных покрытие ENEPIG рекомендуется в качестве альтернативы толстослойному золочению в силовой и высоконадежной электронике, обеспечивая расширенный ресурс работы межсоединений в жестких температурных режимах.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Ламинаты RT6035HTC.Режим доступа: https://www.rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/rt-duroid-laminates/rt-duroid-6035htc-laminates. Дата доступа: 12.09.2026.

[2] Особенности формирования межсоединений в СВЧ микроблоках / В. Л. Ланин [и др.] // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 27-й Международной конференции, Севастополь, 10-16 сент. 2017 г. /Севастопольский государственный университет. – Севастополь, 2017. – С. 882–886.

[3] Технология и оборудование микросварки в производстве изделий электронной техники /И.Б. Петухов, В.Л. Ланин, В.А. Емельянов. – Минск: Интегралполиграф, 2021. –186 с.

[4] Ланин, В. Л. Термозвуковое присоединение медной проволоки к контактным площадкам / В. Ланин, И. Петухов // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2011. – № 2 (00031). – С. 132–137.

[5] QPA100D.Режим доступа: https://www.qorvo.com/products/p/QPA1009D. Дата доступа: 12.09.2026.

[6] Bonding capillary. Режим доступа:https://www.douyee.com/kq/catalogues. Дата доступа: 12.09.2026

[7] Mehrer, H. Diffusion in Solids. Fundamental, methods, materials, diffusion-controlled processes / H. Mehrer / Springer Berlin Heidelberg New York, 2007.– P.651.

MODELLING THE THERMOSONIC BONDING PROCESS FOR MICROWAVE DEVICE ON ENEPIG SUBSTRATES

I. Petuhov

OJSC «Planar-SO», Minsk, Belarus, igorpetuchov@mail.ru

Abstract: a mathematical model of diffusion kinetics has been developed for the thermosonic bonding of 17.5 μm diameter gold wire to a Rogers 6035HTC substrate with an ENEPIG finish. The model demonstrates the high barrier efficiency of a 100 nm palladium layer during ball-wedge thermosonic wire bonding at temperatures of 180–200°C. Matlab simulations indicate that ultrasonic intensification facilitates the formation of a robust bond.
Keywords: wire interconnects, ENEPIG finish, thermosonic bonding, microwave amplifier substrate.

УДК 544, 541

ПЕРВОПРИНЦИПНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ $ZnVN_2$: ОТ ОБЪЕМНОГО МАТЕРИАЛА ДО МОНОСЛОЯ

Устюжанина С.В., Кистанов А.А.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Российская Федерация,
andrei.kistanov.ufa@gmail.com

Аннотация: с помощью первопринципных расчетов исследовано семейство материалов на основе $ZnVN_2$. Стабильность исследованных материалов оценена на основе результатов вычислений фононных спектров и *ab initio* молекулярно-динамического моделирования. Проведена оценка оптоэлектронных и транспортных свойств исследованного семейства материалов $ZnVN_2$. Показано, что объемный и монослойный $ZnVN_2$ являются полупроводниками с непрямой запрещенной зоной. Объемный $ZnVN_2$ демонстрирует коэффициент поглощения ~$1{,}2\times10^6$ см$^{-1}$ в среднеультрафиолетовом диапазоне, а монослой $ZnVN_2$ имеет самый высокий коэффициент поглощения 13,02% в среднеультрафиолетовом диапазоне. Кроме того, установлено, что тип подложки значительно влияет на структурную стабильность монослоя $ZnVN_2$ и его электронные свойства за счет формирования структурных дефектов на границе раздела.

Ключевые слова: теория функционала плотности, двумерный материал, прогнозирование свойств материалов, тройной нитрид, электронные свойства.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время поиск новых двумерных материалов с желаемыми свойствами обычно осуществляется с помощью высокопроизводительного компьютерного скрининга [1]. Этот подход, как правило, использует существующие базы данных в качестве отправной точки для разработки рабочего процесса, позволяющего быстро прогнозировать их свойства и находить перспективных кандидатов для конкретных применений. С другой стороны, расчеты из первых принципов продолжают играть ключевую роль в открытии гипотетических двумерных материалов, позволяя прогнозировать их стабильность, обеспечивая их всестороннюю характеристику и предлагая потенциальные области применения. В частности, теоретически были обнаружены стабильные двумерные модификации нескольких тройных нитридов на основе цинка. Эти соединения демонстрируют высокую стабильность в окружающей среде [2], умеренную ширину запрещенной зоны и высокую подвижность носителей заряда, которая может превышать подвижность их объемных аналогов [3].

В данном исследовании, следуя недавнему предсказанию и синтезу тонких пленок $ZnVN_2$ [4], объемные монослойные формы $ZnVN_2$ были исследованы с использованием первопринципных расчетов. Термодинамическая стабильность исследуемых соединений оценивалась с помощью фононных спектров и расчетов методом *ab initio* молекулярной динамики (AIMD). Также была проведена тщательная характеризация исследуемых соединений, включая определение их оптоэлектронных и транспортных свойств.

II. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 1а показана кристаллическая структура $ZnVN_2$, в виде орторомбического кристалла с параметрами решетки a = 5,25 Å, b = 5,57 Å и c = 6,42 Å. Рассчитанная функция локализации электронов (ФЛЭ) для объемного $ZnVN_2$ (рисунок 1а) показывает сферические области высокой электронной плотности вокруг атомов N, что характерно для ионной связи, где N действует как анион после получения электронов и образования стабильного сферического электронного облака вокруг ядра. Высокая стабильность объемного $ZnVN_2$ также подтверждается его низкой энергией образования -2,22 эВ/атом.

Рассчитанная энергетическая зонная диаграмма объемного $ZnVN_2$, полученная с использованием функционала GGA+U, показана на рисунке 1б. Установлено, что объемный $ZnVN_2$ является полупроводником p-типа с непрямой запрещенной зоной 0,98 эВ (GGA+U). Минимум валентной зоны расположен вблизи точки Г, а максимум зоны проводимости расположен в точке Г. Рассчитанная наименьшая эффективная масса дырки для объемного $ZnVN_2$ составляет $1{,}18m_0$ (вдоль направления Г-Y), а наименьшая эффективная масса электрона – $0{,}24m_0$ (вдоль направления Г-Y).

Рассчитанный коэффициент поглощения α как функция энергии фотона для объемного $ZnVN_2$ показан на рисунке 1в. Объемный $ZnVN_2$ поглощает свет в видимом и инфракрасном диапазонах. Наибольшее значение коэффициента поглощения, составляющее ~$1{,}2\times10^6$ см$^{-1}$ (энергия фотона 6,24 эВ), обнаружено в среднеультрафиолетовой области спектра.

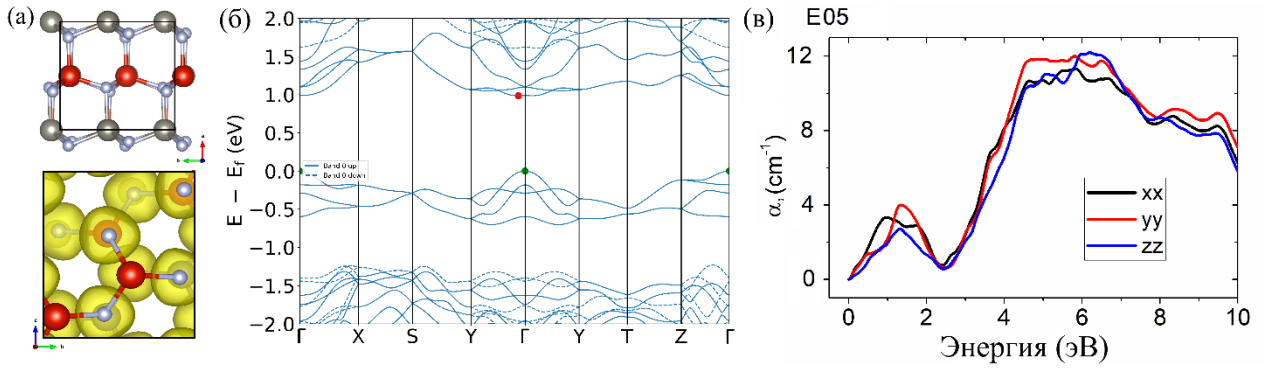


Рисунок 1. Структура элементарной ячейки с интегрированным графиком ФЛЭ (значение изоповерхности равно 0,4) (а), энергетическая зонная диаграмма GGA+U (б) и коэффициент поглощения α как функция энергии фотона (в) объемного $ZnVN_2$

Далее была рассмотрена возможность существования $ZnVN_2$ в форме монослоя. Элементарная ячейка монослоя $ZnVN_2$ (рисунок 2а) была создана на основе объемного $ZnVN_2$. Монослой $ZnVN_2$ стабилизируется в орторомбической решетке с параметрами решетки a = 5,62 Å и b = 6,53 Å. Функция распределения электронной плотности для монослоя $ZnVN_2$ (рисунок 2а) показывает сферические области высокой электронной плотности вокруг атомов N. Подобно объемному $ZnVN_2$, монослой $ZnVN_2$ имеет ионную связь. Кроме того, вокруг атомов V имеются области, которые не полностью локализованы в стандартных ковалентных доменах, что указывает на локализацию электронной плотности на атоме V, которая не полностью распределена между соседними атомами, и указывает на наличие ненасыщенных, потенциально реактивных участков. Энергия образования монослоя $ZnVN_2$ (-2,04 эВ/атом) ниже, чем у объемного $ZnVN_2$, но все же указывает на высокую термодинамическую стабильность монослоя $ZnVN_2$.

Для определения динамической стабильности монослоя $ZnVN_2$ был рассчитан его фононный спектр. Согласно рисунку 2б, все фононные ветви демонстрируют положительные частоты вдоль высокосимметричного пути зоны Бриллюэна, что указывает на отсутствие спонтанного распада материала. Термическая стабильность монослоя $ZnVN_2$ подтверждена с помощью моделирования AIMD. Показано, что структура сохраняет целостность после 4 пс при температуре 300 К, что свидетельствует о ее термической стабильности.

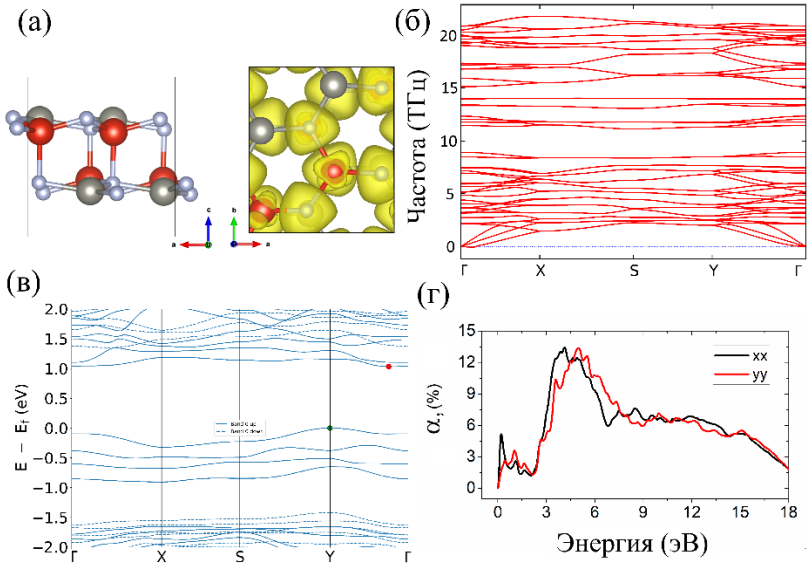


Рисунок 2. Структура элементарной ячейки с интегрированным графиком ФЭЛ (значение изоповерхности равно 0,4) (а), фононный спектр (б), зонная структура GGA+U (в) и коэффициент поглощения α как функция энергии фотона (г) монослоя $ZnVN_2$

На рисунке 2в представлена энергетическая зонная диаграмма монослоя $ZnVN_2$, рассчитанная методом GGA+U. Установлено, что монослой $ZnVN_2$ является полупроводником p-типа с непрямой запрещенной зоной 1,03 эВ. Минимум валентной зоны находится вблизи точки Γ, а максимум зоны проводимости смещается от точки Γ к точке Y. Рассчитанная наименьшая эффективная масса дырки

для монослоя $ZnVN_2$ составляет 2,59m_0 (вдоль направления Г-Y), а наименьшая эффективная масса электрона – 1,39m_0 (вдоль направления Г-Y). Эффективная масса дырки в монослое $ZnVN_2$ примерно в 10 раз выше, чем в объемном $ZnVN_2$, что соответствует менее изогнутой валентной зоне монослоя $ZnVN_2$ по сравнению с объемным $ZnVN_2$. Эффективная масса электрона в объёмном $ZnVN_2$ немного выше, чем в монослое $ZnVN_2$, что может быть связано с преобладанием V-*d* орбиталей вблизи зоны проводимости и несколько меньшей плотностью состояний в зоне проводимости. Рассчитанный коэффициент поглощения α как функция энергии фотона для объемного $ZnVN_2$ показан на рисунке 2г. Монослой $ZnVN_2$ поглощает свет в видимой и инфракрасной областях. Максимальное значение поглощения 13,02% для монослоя $ZnVN_2$ обнаружено в среднеультрафиолетовой области в диапазоне от 4,13 до 6,20 эВ для фотонов с энергией 4,92 эВ.

Также были рассмотрены две наиболее распространенные подложки – Si и Al_2O_3. Параметры решетки оптимизированного монослоя $ZnVN_2$ на подложке Si составляют *a* = 10,69 Å и *b* = 11,87 Å. Эта структура была создана путем разрезания объемного $ZnVN_2$ вдоль поверхности (100) и создания суперъячейки монослоя 2×2. Из-за фиксированных границ вдоль плоскостных направлений во время оптимизации структуры деформация в решетке Si после оптимизации составляет 0%, в то время как монослой $ZnVN_2$ подвергается сжимающей деформации, равной ~4% и ~7% вдоль направлений *x* и *y*, соответственно. Параметры решетки оптимизированного монослоя $ZnVN_2$ на подложке Al_2O_3 составляют *a* = 16,68 Å и *b* = 19,36 Å. Эта структура была создана путем разрезания объемного $ZnVN_2$ вдоль поверхности (100) и создания суперъячейки монослоя 3×3. Благодаря фиксированным границам вдоль плоскостных направлений во время оптимизации структуры, деформация в решетке Al_2O_3 после оптимизации составляет 0%, в то время как монослой $ZnVN_2$ подвергается сжимающей деформации, равной ~0,2 % и ~0,5 % вдоль направлений *x* и *y*, соответственно.

На рисунке 3 показана атомная структура и ФЭЛ для монослоя $ZnVN_2$ на подложках из Si и Al_2O_3. Согласно рисунку 3а, атомы Zn в монослое $ZnVN_2$ смещены относительно своих идеальных атомных положений из-за несоответствия решеток в случае подложки из Si, в то время как монослой сохраняет структурную целостность. Сферическая форма ФЭЛ вокруг атомов N указывает на ионную связь внутри монослоя, как и в случае объемного материала (рисунок 1а). Диаграмма ФЭЛ также показывает образование связей между атомами Si подложки и атомами V и Zn монослоя, что указывает на прочную связь между подложкой и монослоем. С другой стороны, идеальное соответствие решеток монослоя $ZnVN_2$ и подложки Al_2O_3 приводит к более высокой структурной целостности монослоя, как показано на рисунке 3б. Сферическая форма ФЭЛ вокруг атомов N монослоя и атомов O подложки указывает на ионную связь внутри монослоя, как и в случае объемного материала (рисунок 1а), и ионно-ковалентную связь между монослоем и подложкой.

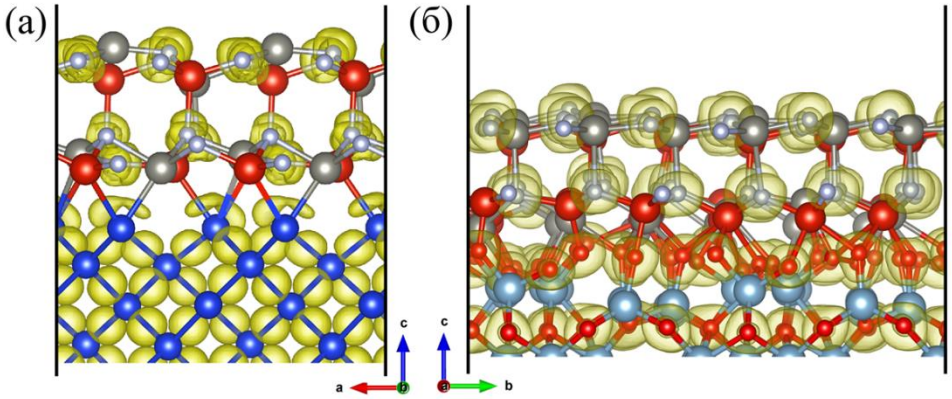


Рисунок 3. Атомная структура и ФЭЛ для монослоя $ZnVN_2$ на подложках Si (а) и Al_2O_3 (б). Значение изоповерхности составляет 0,85 в (а) и 0,75 в (б)

Было установлено, что зона проводимости монослоя $ZnVN_2$ смещена в синюю область спектра и пересекает уровень Ферми при наличии подложки Si. Это объясняется образованием связей V-Si на границе раздела между монослоем и подложкой. В случае подложки Al_2O_3 наблюдается незначительное смещение валентной зоны и появление дополнительных пиков вблизи зоны проводимости, связанных с состояниями N-*p*. Это может быть связано с наличием дефектов, связанных с N, на границе раздела между монослоем и подложкой. Эти дефекты образуются в результате сильного взаимодействия между атомами O подложки и атомами V монослоя, что приводит к образованию непассивированных азотных связей. Функция электронной локализации на рисунке 4 подтверждает, что на границе раздела присутствуют два типа дефектов, связанных с N.

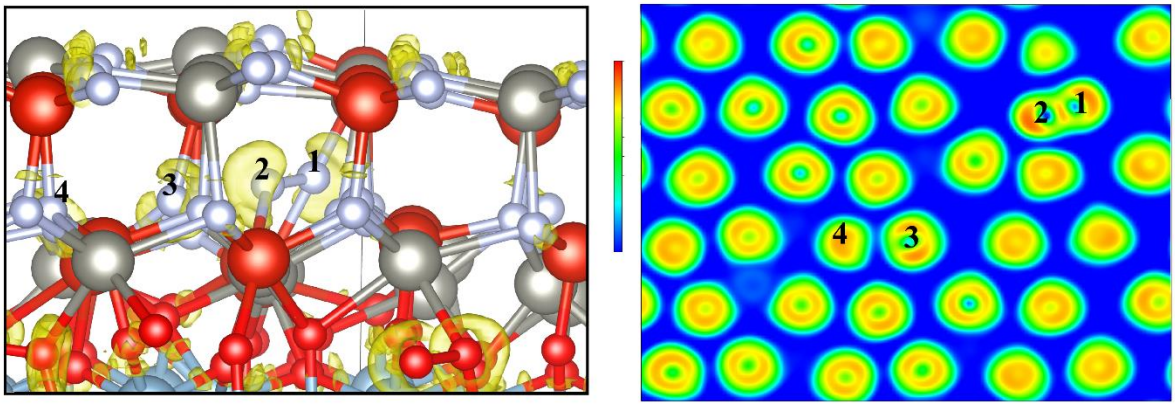


Рисунок 4. Изображение ФЭЛ для связи N–N в монослое $ZnVN_2$ на подложке Al_2O_3. Значение изоповерхности составляет 0,75

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Термодинамическая стабильность объемного и монослоя $ZnVN_2$ была подтверждена с помощью расчета фононного спектра и моделирования AIMD при 300 К. Было проведено исследование оптоэлектронных и транспортных свойств структур $ZnVN_2$. Также показано, что семейство структур $ZnVN_2$ обладает сравнительно высокой способностью к поглощению света. Кроме того, продемонстрировано, что осаждение монослоя $ZnVN_2$ на подложках может приводить к образованию структурных дефектов на границе раздела из-за несоответствия решеток (подложка из Si) или сильных межслоевых взаимодействий (подложка из Al_2O_3), что влияет на электронные свойства монослоя $ZnVN_2$.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-23-00744, https://rscf.ru/project/25-23-00744.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Materials Informatics Framework for Accelerated Discovery of High-Refractive-Index 2D Materials / L. A. Klimova [et al.] // ACS Nano. 2026. Vol. 20, No 3. P. 2623–2632. https://doi.org/10.1021/acsnano.5c10644.

[2] Atomic Insights into the Interaction of N_2, CO_2, NH_3, NO, and NO_2 Gas Molecules with $Zn_2(V,Nb,Ta)N_3$ Ternary Nitride Monolayers / A.A. Kistanov // Phys. Chem. Chem. Phys. 2024. Vol. 26, No 18. P. 13719–13730. https://doi.org/10.1039/D4CP01225A.

[3] Carrier Transport in Bulk and Two-Dimensional $Zn_2(V,Nb,Ta)N_3$ Ternary Nitrides / I. V. Kosarev, A. A. Kistanov // Nanoscale. 2024. Vol. 16 No 20. P. 10030–10037. https://doi.org/10.1039/D4NR01292E.

[4] Synthesis and Characterization of the Ternary Nitride Semiconductor Zn_2VN_3: Theoretical Prediction, Combinatorial Screening, and Epitaxial Stabilization / S. Zhuk[et al.] // Chem. Mater. 2021. Vol. 33, No 23. P. 9306–9316. https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.1c03025.

FIRST-PRINCIPLES STUDY OF $ZnVN_2$: FROM BULK TO MONOLAYER

S. Ustiuzhanina, A. Kistanov

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation, andrei.kistanov.ufa@gmail.com

Abstract: a family of $ZnVN_2$-based materials was studied using first-principles calculations. The stability of the studied materials was assessed based on the results of phonon spectral calculations and *ab initio* molecular dynamics modeling. The optoelectronic and transport properties of the studied $ZnVN_2$ family of materials were evaluated. It was shown that bulk and monolayer $ZnVN_2$ are indirect bandgap semiconductors. Bulk $ZnVN_2$ exhibits an absorption coefficient of ~1.2×10^6 cm^{-1} in the mid-ultraviolet range, while the $ZnVN_2$ monolayer has the highest absorption coefficient of 13.02% in the mid-ultraviolet range. Furthermore, it was found that the substrate type significantly affects the structural stability of the $ZnVN_2$ monolayer and its electronic properties due to the formation of structural defects at the interface.

Keywords: DFT, *ab initio*, 2D material, material prediction, ternary nitride, electronic properties.

УДК 666.65

РАЗРАБОТКА КОНДЕНСАТОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ (Ba,Sr,Ca)TiO_3

Хрусталев А.Н.[1], Базарова В.Е.[1], Арбанас Л.А.[1], Верхова Е.Д.[1], Акиньшин И.Д.[1], Серова Е.К.[1], Холодкова А.А.[1,2], Грабеклис С.К.[1], Бондарев С.В.[3,4], Смирнов А.В.[1]

[1]МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия, lywn@yandex.ru

[2]Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

[3]Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

[4]Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Красноярск, Россия

Аннотация: керамические материалы на основе титанатов щелочноземельных металлов со структурой перовскита рассматриваются в качестве одной из наиболее перспективных систем для создания конденсаторных диэлектриков с регулируемыми электрофизическими характеристиками. Целенаправленное варьирование катионного состава в позиции A и B позволяет управлять значениями относительной диэлектрической проницаемости (ε) и тангенса угла диэлектрических потерь (tgδ) в широком концентрационном, температурном и частотном диапазонах. В настоящей работе представлены результаты экспериментального синтеза двойных и тройных твердых растворов на основе $CaTiO_3$, $SrTiO_3$ и $BaTiO_3$ во всем диапазоне концентраций.

Ключевые слова: диэлектрические конденсаторы, керамика, СВЧ-техника, твердые растворы, перовскиты, $BaTiO_3$.

I. ВВЕДЕНИЕ

Неотъемлемой частью современной радио- и электротехники являются конденсаторы, применяющиеся в фильтрах, накопителях энергии, устройствах согласования и многих других компонентах радиоэлектронной аппаратуры [1]. К ключевым свойствам материалов для конденсаторов относятся относительная диэлектрическая проницаемость (εr), тангенс угла диэлектрических потерь (tgδ) и удельное сопротивление, которые должны сохранять стабильность в рабочем частотном и температурном интервалах. Рабочие характеристики конденсатора меняются с изменением влажности и температуры, поэтому учет и прогнозирование этих параметров достаточно важны для проектирования изделий.

Система (Sr, Ca)TiO_3 является неограниченно растворимой, поэтому регулирование характеристик за счет создания твердых растворов возможно в диапазоне концентраций от 0 до 100%. Как известно, для системы $Sr_{1-x}Ca_xTiO_3$ характерно изменение сингонии при изменении содержания допанта, так кубическая сингония находится в диапазоне $0 < x < 0{,}18$, при увеличении концентрации в диапазоне $0{,}18 < x < 0{,}48$ характерна тетрагональная сингония (T), для остальной области концентраций орторомбическая сингония (OR). Добавление небольшого количества ионов Ca^{2+} ($x < 0{,}1$) характер температурной и частотной зависимостей относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь не изменяется. При этом при добавлении небольшого значения концентрации Ca^{2+} относительная диэлектрическая проницаемость незначительно увеличивается при комнатной температуре.

Система (Ba, Sr)TiO_3 также является неограниченно растворимой. При увеличении содержания иона Sr^{2+} относительная диэлектрическая проницаемость твердого раствора уменьшается. При этом пик εr уширяется и смещается в область низких температур. Такой эффект наблюдается ввиду того, что Sr^{2+} в твердом растворе (Ba, Sr)TiO_3 является добавкой-шифтером. Добавка Sr^{2+} смещает точку Кюри (T_c ($SrTiO_3$) = –168 °C, T_c ($BaTiO_3$) = 120-130 °C).

В отличие от твердого раствора на основе (Sr, Ca)TiO_3 и (Ba, Sr)TiO_3, твердые растворы на основе (Ca, Ba)TiO_3 ограниченно растворимы из-за разности ионных радиусов Ca^{2+} (rA = 1,34 Å) и Ba^{2+} (rA = 1,61 Å) [2].

II. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Синтез индивидуальных титанатов осуществляли твердофазным методом из карбонатов соответствующих щелочноземельных металлов ($CaCO_3$, $SrCO_3$, $BaCO_3$) и диоксида титана (TiO_2) в стехиометрических соотношениях. Предварительный обжиг проводили при температурах 1100°C.

Твердые растворы двойных (Ca,Sr)TiO_3, (Ba,Sr)TiO_3, (Ba,Ca)TiO_3 и тройных (Ba,Sr,Ca)TiO_3 составов получали путем смешивания синтезированных титанатов в требуемых мольных соотношениях. Образцы формовали методом полусухого прессования при удельном давлении 100 МПа и спекали на воздухе при температурах 1350–1500°C в течение 0 – 2 ч.

Исследование образцов проводилось методами рентгенофазового анализа и сканирующей электронной микроскопией. Рентгенограммы получали с помощью рентгеновского порошкового дифрактометра PowDIX 600 (ЗАО «ЛИНЕВ АДАНИ», Республика Беларусь). В качестве материала анода используется Cu с Ni-фильтром, анодное напряжение – 30 кВ, анодный ток – 10 мА. Съемку проводили в диапазоне 2θ: 5-80° со скоростью 3,5 °/мин с шагом 0,01°. Микроструктуру керамических образцов изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа Zem 15C (Zeptoops, Китай). Ускоряющее напряжение составляло 15 кВ, увеличение x500. Кажущуюся плотность керамики определяли методом Архимеда, относительную высчитывали отношением кажущейся плотности к истинной. За истинную плотность материалов принимали значения для $BaTiO_3$ 6,12 г/см^3, для $SrTiO_3$ 5,12 г/см^3, $CaTiO_3$ 4,1 г/см^3 для твердых растворов высчитывали по правилу аддитивности исходя из плотностей и соотношения выбранных компонентов. Диэлектрические измерения проводили на частотах 1 кГц и 100 кГц с использованием измерителя иммитанса.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В диапазоне температур 800–1100 °C определены оптимальные условия синтеза индивидуальных компонентов $BaTiO_3$ (BT), $SrTiO_3$ (ST) и $CaTiO_3$ (CT), обеспечивающих получение однофазных порошков для последующего синтеза твердых растворов системы (Ba,Sr,Ca)TiO_3. Методом рентгенофазового анализа подтверждено образование перовскитной структуры во всем исследованном диапазоне концентраций. Уточненные параметры элементарной ячейки свидетельствуют об изменении сингонии в зависимости от содержания ионов-допантов: при малых концентрациях Ca^{2+} и Sr^{2+} сохраняется тетрагональная сингония, характерная для $BaTiO_3$, тогда как увеличение доли Sr^{2+} и Ca^{2+} приводит к переходу к кубической и орторомбической сингониям соответственно, что согласуется с литературными данными для двойных систем (Ba,Sr)TiO_3 и (Sr,Ca)TiO_3.

Образцы, полученные при 1400°C в течении 1 часа демонстрирует немонотонную зависимость от состава, так с ростом содержания $CaTiO_3$ плотность закономерно снижается от ~5.75 г/см^3 у составов с большим содержанием $BaTiO_3$, до ~3.76 г/см³ у чистого $CaTiO_3$, что отражает замещение крупного бария более лёгким кальцием и соответствующее уменьшение параметра решётки, диэлектрическая проницаемость при этом также падает от ~1900 - 2300 в области $BaTiO_3$ до ~163 у $CaTiO_3$, а тангенс диэлектрических потерь в большинстве составов остаётся низким (0.0001–0.02), что говорит о сохранении малых потерь даже при столь высокой температуре. Добавление $SrTiO_3$ к $BaTiO_3$ сначала повышает εr с выраженными максимумами в тройных составах (например, 5407 при $Ba_{0.7}Sr_{0.3}TiO_3$ и аномально высокое 13692 при $Ba_{0.6}Sr_{0.3}Ca_{0.1}TiO_3$), что может быть связано с прохождением через морфотропную область или фазовый переход, а затем при дальнейшем замещении бария стронцием и кальцием проницаемость снижается; плотность при этом ведёт себя более монотонно и в основном следует за уменьшением среднего ионного радиуса A - позиции.

Установлено, что частичное замещение Ba^{2+} на Sr^{2+} и Ca^{2+} позволяет целенаправленно регулировать диэлектрическую проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь в широком диапазоне значений, обеспечивая стабильность характеристик в рабочем температурном и частотном интервалах. Показано, что относительная плотность керамики, спеченной при 1400–1500 °C, достигает 95–97 % от теоретической, что обеспечивает воспроизводимость диэлектрических свойств. Полученные результаты подтверждают перспективность системы двойных и тройных твердых растворов (Ba,Sr,Ca)TiO_3 для создания конденсаторных материалов с регулируемыми электрофизическими характеристиками.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы методом твердофазного синтеза получены двойные и тройные твердые растворы на основе $CaTiO_3$, $SrTiO_3$ и $BaTiO_3$ во всем диапазоне концентраций. Определены оптимальные условия синтеза индивидуальных компонентов (BT, ST, CT) в интервале температур 800–1100 °C и условия спекания керамики при 1400–1500 °C, обеспечивающие получение плотных образцов с относительной плотностью до 95–97 %.

Методом рентгенофазового анализа подтверждено образование перовскитной структуры и установлено изменение сингонии в зависимости от содержания ионов-допантов: при малых концентрациях Ca^{2+} и Sr^{2+} сохраняется тетрагональная сингония, характерная для $BaTiO_3$, тогда как

увеличение доли Sr^{2+} и Ca^{2+} приводит к переходу к кубической и орторомбической сингониям соответственно.

Показано, что зависимости относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь от состава имеют экстремальный характер в области малого содержания иона Ca^{2+}. Наибольшие значения εr (>700) достигнуты для составов с содержанием Ba^{2+} > 40 мол. %, Sr^{2+} < 60 мол. % и Ca^{2+} < 40 мол. %. Введение избытка Sr^{2+} и Ca^{2+} снижает εr до значений 300–400, а минимальные значения (180–300) характерны для составов на основе $CaTiO_3$ и $SrTiO_3$.

Установлено, что целенаправленное варьирование катионного состава в позиции A позволяет регулировать значения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в широком концентрационном, температурном и частотном диапазонах. Полученные результаты подтверждают перспективность системы двойных и тройных твердых растворов $(Ba,Sr,Ca)TiO_3$ для создания конденсаторных материалов с регулируемыми электрофизическими характеристиками.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках проекта Государственного Задания № FWES-2026-0020.

ЛИТЕРАТУРА

[1] С. Г. Пономарев, В. Е. Базарова, И. Д. Акиньшин и др. Керамика со сверхвысокими значениями диэлектрической проницаемости: составы, методы синтеза и свойства при низких и средних частотах // Стекло и керамика. – 2024. – Т. 97, № 3(1155). – С. 44-59. – DOI 10.14489/glc.2024.03.pp.044-059.

[2] А. Н. Хрусталев, В. Е. Базарова, Е. Д. Верхова и др. Диэлектрические свойства твердых растворов титанатов щелочноземельных металлов структуры перовскита // Стекло и керамика. – 2025. – Т. 98, № 5(1169). – С. 41-55. – DOI 10.14489/glc.2025.05.pp.041-055.

DEVELOPMENT OF CAPACITOR MATERIALS BASED ON THE SOLID SOLUTION SYSTEM $(Ba,Sr,Ca)TiO_3$

A.N. Khrustalev[1], V.E. Bazarova[1], L.A. Arbanas[1], E.D. Verkhova[1], I.D. Akin'shin[1], E.K. Serova[1], A.A. Kholodkova[1,2], S.K. Grabeklis[1], S.V. Bondarev[3,4], A.V. Smirnov[1]

[1]MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia, lywn@yandex.ru

[2]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

[3]Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

[4]Federal Research Center "Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences", Krasnoyarsk, Russia

Abstract: ceramic materials based on alkaline earth metal titanates with a perovskite structure are considered to be one of the most promising systems for creating capacitor dielectrics with tunable electrophysical characteristics. Purposeful variation of the cation composition in the A and B sites allows controlling the values of relative permittivity (ε) and dielectric loss tangent (tgδ) over a wide concentration, temperature, and frequency range. This work presents the results of experimental synthesis of binary and ternary solid solutions based on $CaTiO_3$, $SrTiO_3$, and $BaTiO_3$ across the entire concentration range.

Keywords: dielectric capacitors, ceramics, microwave engineering, solid solutions, perovskites, $BaTiO_3$ (barium titanate).

УДК 539.23

ДОПИРОВАНИЕ ПЕРОВСКИТА МОНОЭТАНОЛАМИНОМ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИХ ЯЧЕЕК НА ЕГО ОСНОВЕ

Тучковский А.К., Кашко И.А., Лабунов В.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, kashko.ivan81@bsuir.by

Аннотация: перовскитные солнечные элементы перспективны из-за дешевизны и простоты технологических процессов при их изготовлении. Предложена модернизация технологии изготовления фотовольтаических ячеек путем введения моноэтаноламина в металлорганический перовскитный слой. Введение примеси позволило увеличить эффективность перовскитных фотовольтаических ячеек на 40% относительно ячеек, приготовленных по базовой технологии без моноэтаноламина.

Ключевые слова: моноэтаноламин, перовскитная фотовольтаическая ячейка, сканирующая атомно-силовая микроскопия.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время стоит проблема поиска дешевых альтернативных источников энергии. Одним из перспективных направлений является солнечная энергетика. Активно развиваются солнечные элементы на основе металлоорганических перовскитов, демонстрирующие рекордные темпы роста эффективности – с 3,8% в 2009 году до более 25% сегодня [1]. Перовскиты обладают высокой абсорбционной способностью и совместимы с жидкофазными методами нанесения. Ключевую роль в таких структурах играют добавки, позволяющие стабилизировать перовскит, и тем самым повысить эффективность и долговечность фотовольтаической ячейки.

II МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ НА ОСНОВЕ МЕТАЛООРГАНИЧЕСКОГО ПЕРОВСКИТА

Технология изготовления фотовольтаической ячейки представляет собой два параллельных технологических процесса: формирование части, содержащей зарядово-транспортные слои n-типа проводимости и формирование части со слоями p-типа проводимости с последующим механическим соединением двух подложек.

Технологическая схема сборки металлоорганической перовскитной фотовольтаической структуры с использованием двух отдельных подложек состоит из ряда этапов. На первом этапе на непрозрачную гладкую подложку №1 последовательно наносился высокочастотным магнетронным распылением слой алюминия (Al) толщиной 600 нм для формирования тыльного контакта, затем слой титана (Ti) в качестве адгезионного и барьерного слоя. Слой титана толщиной 100 нм формировался с использованием системы электронно-лучевого испарения. Далее подложка с нанесенным слоем титана подвергалась частичному электрохимическому анодированию в 10% водном растворе щавелевой кислоты. Толщина получаемого слоя оксида титана (TiOx) регулировалась с помощью напряжения, подаваемого на электроды в процессе анодирования. При постоянном напряжении по мере роста окисной пленки сопротивление системы возрастало и соответственно уменьшался ток, протекающий через структуру. Через некоторое время ток приближался к нолю, и рост окисла также останавливался. Для формирования транспортного слоя n-типа толщиной около 40 нм требовалось подавать на электроды напряжение около 35 В. Для кристаллизации слоя TiOx и улучшения его свойств проводился вакуумный отжиг подложки при 400 ºС.

Параллельно на стеклянной подложке №2 с прозрачным проводящим покрытием на основе индий-олова (ITO) с удельным поверхностным сопротивлением 20 Ом/кв. формировался дырочно-транспортный слой на основе оксида никеля (NiOx) толщиной 40 нм. Формирование слоя NiOx осуществлялось с помощью реактивного высокочастотного магнетронного распыления из трехдюймовой мишени Ni-95%, Va-5%. В процессе распыления мишени в аргоновую плазму подавался кислород. Затем для стабилизации слоя NiOx также проводился вакуумный отжиг подложки при 400 ºС.

Далее наступал самый ответственный момент формирования раствора перовскита. Для получения металлорганического перовскита получали два раствора, которые в последующем смешивали между собой. Первый раствор получали путем смешивания метиламмония йодида CH_3NH_3I с диметилформамидом в соотношении 1:3. Второй раствор получали путем смешивания йодида свинца PbI_2 с диметилформамидом также в соотношении 1:3. Растворы тщательно перемешивали до полного растворения компонент. После чего производили смешивание растворов содержащих 1,4 г PbI_2 и 0,5 г

CH_3NH_3I. Далее полученный раствор перемешивали на магнитной мешалке при 80 °С в течение двух часов. Заключительным этапом синтеза раствора металлорганического перовскита являлась продувка в потоке аргона при 90 °С до удаления избытка растворителя в течение двух часов. В результате получали концентрированный раствор перовскита в виде вязкой темно-коричневой жидкости.

Формирование пленки металлоорганического перовскита осуществляли как на подложке с предварительно нанесённым слоем NiOx, так и на подложке покрытой слоем TiOx. Подложки подвергали предварительному нагреву на плоском нагревателе до температуры 60 °С с целью удаления адсорбированной влаги с поверхности и улучшения смачиваемости при нанесении раствора. Далее с помощью автоматического дозатора или пипетки на подложку наносили несколько капель раствора прекурсора - металлоорганического перовскита состава $CH_3NH_3PbI_3$, растворённого в диметилформамиде. После нанесения подложку помещали в центрифугу и проводили вращение для равномерного распределения раствора по поверхности. Оптимальные режимы центрифугирования: скорость вращения 600 об/мин, продолжительность 20 секунд. В результате формировалась влажная пленка перовскита толщиной около 1 мкм.

После центрифугирования подложку с влажной пленкой переносили на плоский нагреватель и проводили термическую обработку (отжиг) при температуре 110 °С. Отжиг выполняли до полного испарения растворителя и завершения процесса кристаллизации перовскита. Визуальным критерием формирования фотоактивной фазы служило изменение цвета пленки: изначально желтоватая окраска (характерная для несформированного $CH_3NH_3PbI_3$) постепенно переходила в коричнево-черную, что свидетельствовало о переходе материала в перовскитную структуру.

Для допирования металлоорганического перовскита вида $CH_3NH_3PbI_3$ нами использовался моноэтаноламин ($H_2N\text{-}CH_2\text{-}CH_2\text{-}OH$), перемешанный с 50% водным раствором иодистого водорода (HI). В данный раствор добавлялся диметилформамид в соотношении 1:3 и производилось выпаривание остатков воды при температуре 80 ºС в течение двух часов. Далее полученный обезвоженный раствор перемешивался с раствором перовскита для получения 5%, 10% и 15% допированного раствора перовскита.

Таким образом, на подложке №1 формировалась структура Al/Ti/TiOx/перовскит, а на стеклянной подложке №2 - структура ITO/NiOx/перовскит. Завершающим этапом являлось механическое соединение двух подложек, в результате которого формировалась фотовольтаическая ячейка, представляющая собой структуру стекло/ITO/NiOx/перовскит/TiOx/Ti/Al.

III ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛЕНОК И ЯЧЕЕК

Допированные моноэтаноламином и беспримесные пленки металлоорганического перовскита исследовались с помощью сканирующей атомно-силовой микроскопии (рис. 1). Как видно из рисунка 1а перовскитная пленка без примеси моноэтаноламина имеет относительно гладкую поверхность. При введении в перовскит моноэтаноламина (рис. 1б-1г) поверхность становится более зернистой, за счет чего возрастает и поверхностная площадь пленки. Развитость поверхности пленки возрастает по мере увеличения концентрации моноэтаноламина в перовските.

Исследование эффективности фотовольтаических ячеек производилось с использование имитатора солнечного спектра AM 1,5 при мощности падающего светового потока 100 мВт/см^2.

По кривым измеренных вольт-амперных характеристик (ВАХ) (рис. 2) можно найти точки максимальной эффективности ячеек и рассчитать их эффективность. Видно, что по мере роста концентрации моноэтаноламина в перовските эффективность ячейки возрастает и достигает своего максимального значения при 10%. Дальнейший рост концентрации допанта приводит к снижению плотности тока короткого замыкания и напряжения холостого хода, что обуславливает падение эффективности ячеек. Рост эффективности фотовольтаических ячеек при добавлении моноэтаноламина обусловлен его структурой, у которой электронная плотность смещена в сторону гидрооксильной группы, обладающей большей электроотрицательностью за счет присутствия кислорода в молекуле. Соответственно в перовскитоподобном соединении водородная связь между амином и йодом становится более прочной. В результате данная структура становится более стабильной и в результате повышается долговечность.

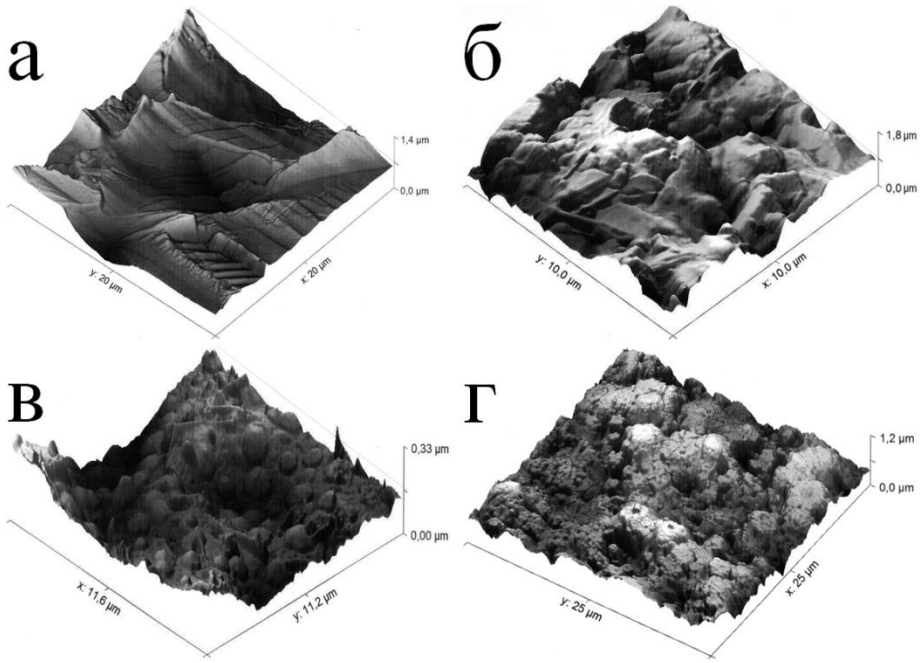
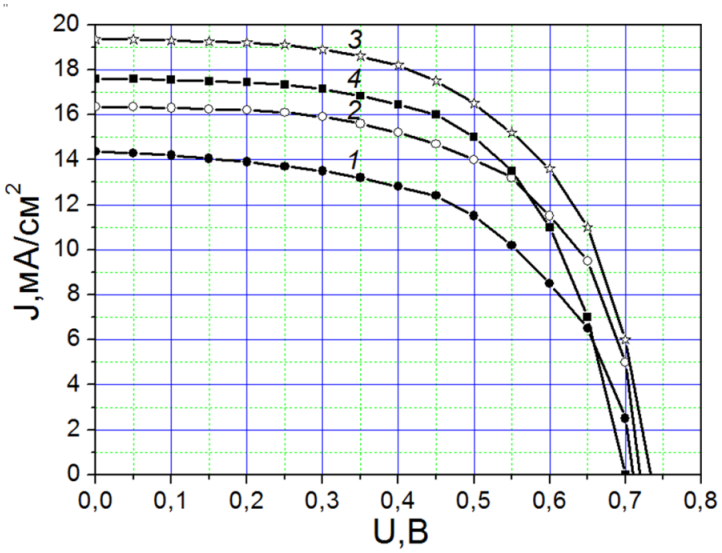


Рисунок 1. Поверхность перовскитной пленки снятая с использованием атомно-силовой микроскопии *а*) без добавки в перовскит моноэтаноламина; *б*) с добавкой в перовскит моноэтаноламина 5%;*в)* с добавкой в перовскит моноэтаноламина 10%;*г*) с добавкой в перовскит моноэтаноламина 15%



1 – без добавки в перовскит моноэтаноламина;*2* – с добавкой в перовскит моноэтаноламина 5%;
3 – с добавкой в перовскит моноэтаноламина 10%;*4* – с добавкой в перовскит моноэтаноламина 15%
Рисунок 2. ВАХ фотовольтаических ячеек

Связывая эффективность фотовольтаических ячеек с поверхностью пленки перовскита можно сделать выводы, что по мере увеличения разветвленности поверхности перовскита, площадь барьерного слоя возрастает. Это в свою очередь приводит к увеличению эффективности разделения заряда и как следствие возрастанию фототока. Дальнейшее увеличение концентрации моноэтаноламина в перовскитной пленке приводит к уменьшение размера зерен структуры пленки и как следствие к возрастанию количества границ. Возрастание количества границ приводит к возрастанию потерь носителей заряда на ловушках и дефектах, что уменьшает фототок ячейки.

Имея кривые измеренных ВАХ фотовольтаических ячеек можно посчитать их эффективность. Эффективность ячейки без добавки в перовскит моноэтаноламина (кривая *1*) составила 5,75 %, эффективность ячейки содержащей 5% моноэтаноламина (кривая *2*) 7,26%, эффективность ячейки содержащей 10% моноэтаноламина (кривая *3*) 8,66%, эффективность ячейки содержащей 15% моноэтаноламина (кривая *4*) 7,5%.

IV ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана технология изготовления металлорганических перовскитных фотовольтаических ячеек с добавкой моноэтаноламина. Улучшенная технология позволила увеличить эффективность и стабильность функционирования фотовольтаических ячеек. Также следует отметить универсальность разработанной технологии, что позволяет интегрировать перовскитные фотовольтаические ячейки с оптоэлектронными компонентами кремниевой фотоники [2-8]. Это открывает новые возможности для развития кремниевой интегральной фотоники в целом.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках НИР 5 «Формирование и свойства перовскитных соединений для применения в составе фоточувствительных элементов радиофотонных интегральных схем на кремниевой основе» включенной в задание 5.3.09 «Компонентная база радиофотонных интегральных схем» ГПНИ «Фотоника и микроэлектроника», 2026−2030 гг.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Afre, R .Perovskite Solar Cells: A Review of the Latest Advances in Materials, Fabrication Techniques, and Stability Enhancement Strategies/ R. A. Afre, D. Pugliese // Micromachines. - 2024. – Vol. 15, №2., 192.

[2] Fabrication, Deposition, Morphology and Composition of Perovskite CsPb (Br1-xIx)3 / U. Turavets [et al.] // IEEE International Conference on Nanotechnology (NANO) : 24th International conference, Gijon, Spain, July 8-11, 2024. – USA : IEEE, 2024. – P.297–301. DOI: 10.1109/NANO61778.2024.10628559.

[3] Katsuba, P. Stable electroluminescence of nanostructured silicon embedded into anodic alumina / P Katsuba [et al.] //Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 2009. - Vol. 41, № 6, - P. 931-934.

[4] Lazarouk, S. Optical characterization of reverse biased porous silicon light emitting diode /S Lazarouk [et al.] //Materials Science and Engineering, 2000. - B 69, - P. 114-117.

[5] Jaguiro, P. Si-based optoelectronic couple/ P Jaguiro [et al.] //Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, 2009. - Vol. 41, № 6, - P. 1094-1096.

[6] Jaguiro, P. Si-based emissive microdisplays/ P Jaguiro[et al.] //Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 2009. - Vol. 41, № 6, - P. 927-930.

[7] Lazarouk, S. Electroluminescence from aluminum-porous silicon reverse-biased Schottky diodes formed on the base of highly doped n-type polysilicon / S. Lazarouk [et al.] // Thin Solid Films. – 1996. – Vol. 276, № 1. – P. 296-298.

[8] Berashevich, J.A. Electroluminescence in porous silicon at a reverse bias voltage applied to the Schottky barrier / J.A. Berashevich, S.K. Lazarouk, V.E. Borisenko // Semiconductors. – 2006. – Vol. 40, № 2. – P. 234-239.

DOPING PEROVSKITE WITH MONOETHANOLAMINE TO ENHANCE THE EFFICIENCY OF PEROVSKITE-BASED PHOTOVOLTAIC CELLS

A.K. Tuchkovsky, I.A. Kashko, V.A. Labunov

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
kashko.ivan81@bsuir.by

Abstract: perovskite solar cells are promising due to their low cost and the simplicity of their manufacturing processes. A modification to the photovoltaic cell fabrication technology has been proposed, involving the introduction of monoethanolamine into the organometallic perovskite layer. This additive increased the efficiency of the perovskite photovoltaic cells by 40% compared to cells produced using the standard process without monoethanolamine.

Keywords: monoethanolamine; perovskite photovoltaic cell; scanning atomic force microscopy.

УДК 621.78

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДАМИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Козик Е.С., Корчагина С.А., Королева А.В.

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация,
korchaginasa@yandex.ru

Аннотация: в работе представлено комплексное исследование структурных превращений и механических свойств конструкционной стали 45 после закалки и низкого отпуска. Экспериментальные данные по микроструктуре и твердости верифицированы методами вычислительной термодинамики и кинетического моделирования. Построение диаграммы состояния Fe-C выполнено в программном обеспечении Thermo-Calc, расчет критических точек проведен по эмпирическим формулам Эндрюса, а кинетика мартенситного превращения описана моделью Койстинена-Марбургера. Показано, что расчетные данные находятся в хорошем согласии с экспериментальными результатами и справочными данными. Обсуждаются причины разброса значений твердости и перспективы применения регрессионных моделей для прогнозирования структуры.

Ключевые слова: сталь 45, термическая обработка, моделирование, мартенситное превращение, TTT-диаграмма

I. ВВЕДЕНИЕ

Традиционный подход к оптимизации режимов термообработки базируется на дорогостоящем и трудоёмком экспериментальном подборе. В связи с этим, интеграция экспериментальных исследований с методами вычислительного материаловедения позволяет не только верифицировать полученные результаты, но и прогнозировать фазовый состав и механические свойства в зависимости от термической истории [2, 9].

Целью данной работы является верификация экспериментальных данных, полученных для стали 45, с помощью современных термодинамических и кинетических моделей. Такой подход позволяет подтвердить достоверность эксперимента и заложить фундамент для дальнейшего прогнозирования свойств материалов.

Объектом исследования выбрана конструкционная углеродистая сталь 45. Химический состав стали принят в соответствии с ГОСТ 1050-2013 [2]: C (0,42–0,50%), Si (0,17–0,37%), Mn (0,50–0,80%), P (не более 0,030%), S (не более 0,035%), а также Cr, Ni, Cu (каждого не более 0,25–0,30%).

II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Термическая обработка включала закалку с температурами 830-850℃ и низкий отпуск при 150-250℃.

Обоснование температурного режима отпуска может быть подтверждено эмпирическим правилом, согласно которому отпуск происходит при температурах порядка (0,25-0,3)*$T_{пл}$.

Применялись следующие методы моделирования: термодинамическое моделирование диаграммы состояния Fe-C выполнено в программном пакете Thermo-Calc с использованием базы данных TCFE [4]; расчет критических точек TTT-диаграммы проведен по эмпирическим формулам Эндрюса [7]; кинетика мартенситного превращения смоделирована по уравнению Койстинена-Марбургера [8]; для сравнительного анализа эмпирических моделей привлекались данные регрессионного анализа из рецензируемых источников [9, 10].

III. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Термодинамическое моделирование фазового состава. С использованием Thermo-Calc была построена диаграмма состояния Fe-C для диапазона содержания углерода до 2,14% (рис. 1). Расчетные области фаз (LIQUID, FCC_A1 – аустенит, BCC_A2 – феррит, GRAPHITE_A9) и горизонтальные линии превращений (эвтектическое при ~1420 K и эвтектоидное при ~1000 K) совпадают с классической диаграммой, представленной в фундаментальной работе А.П. Гуляева [3].

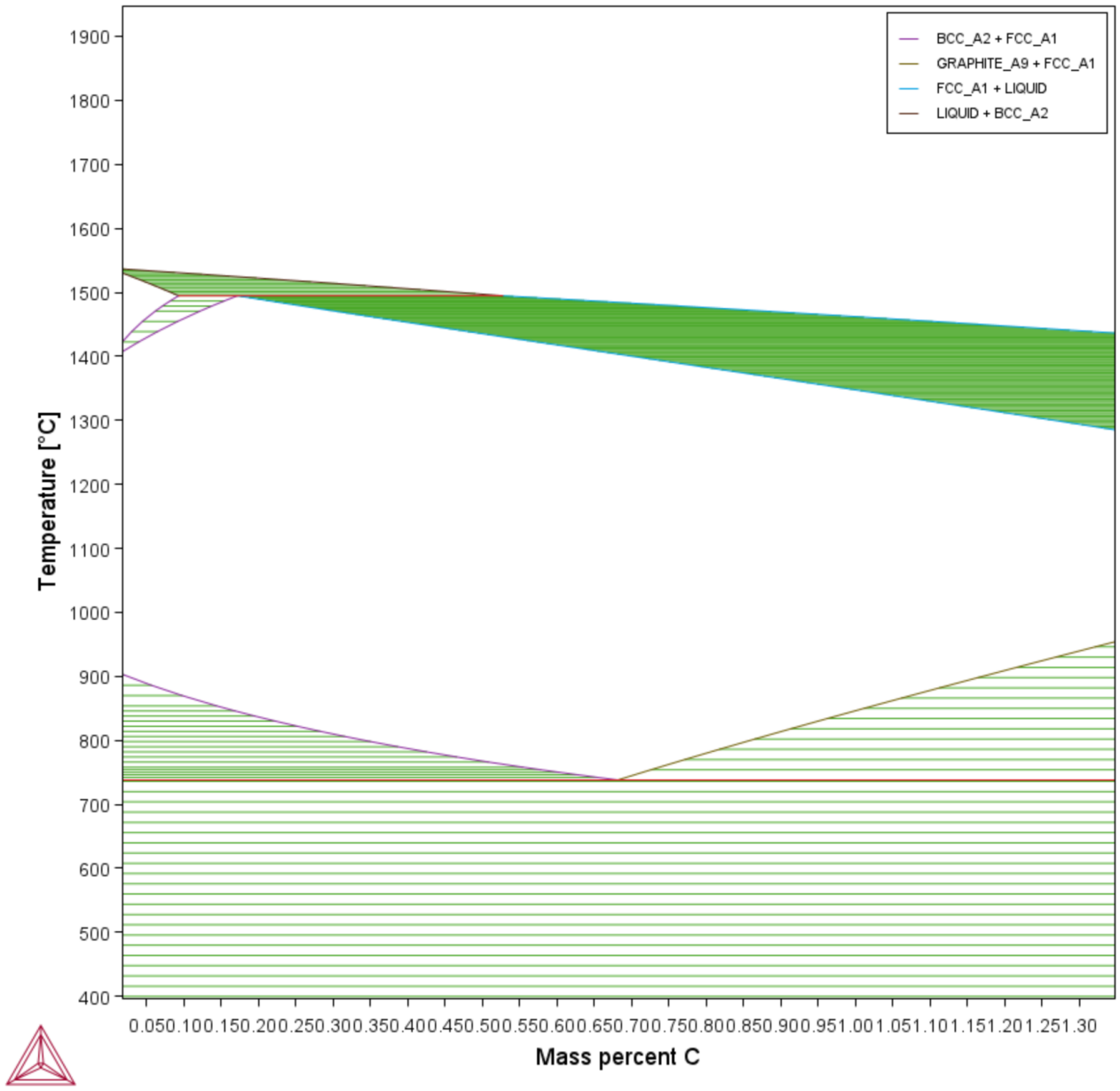


Рисунок 1. Расчетная диаграмма из Thermo-Calc

Кинетическое моделирование и критические точки. Для верификации фазовых превращений был рассчитан распад переохлаждённого аустенита. Критические точки для среднего состава стали 45 (C=0,45%; Mn=0,65%; Si=0,27%) рассчитывались по формулам Эндрюса (1-4) и построили TTT-диаграмму распада аустенита (рис. 2) [7].

Расчетные значения составили:

$$Ac_1 \approx 724 - 725℃ \quad (1)$$

$$Ac_3 \approx 748 - 764℃ \quad (2)$$

$$M_s \approx 326℃ \quad (3)$$

$$M_f \approx -140℃ \quad (4)$$

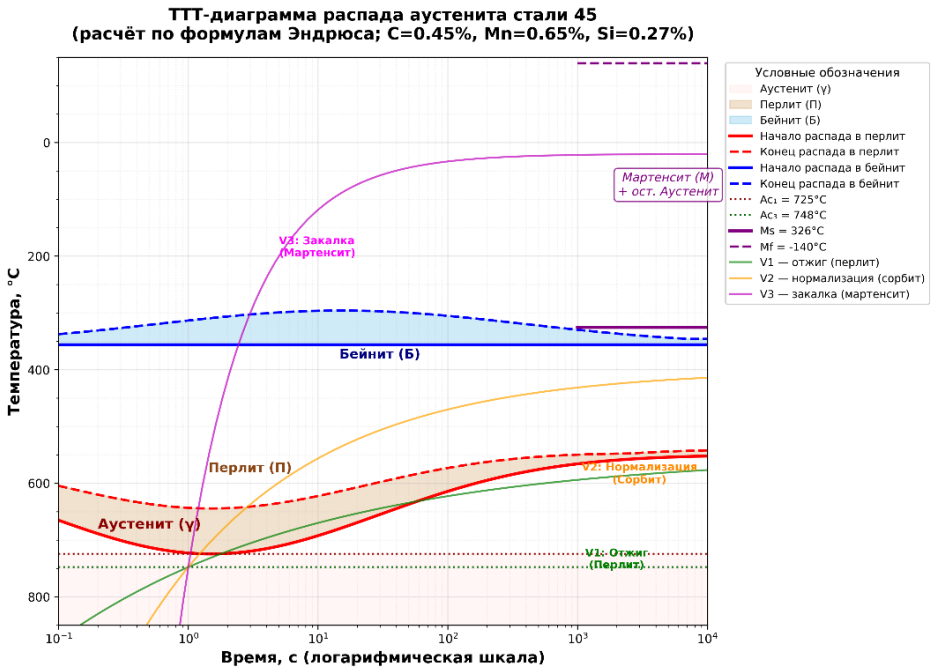


Рисунок 2. Расчётная TTT-диаграмма распада аустенита стали 45 (построена с использованием языка программирования Python с использованием библиотек: numpy, matplotlib.pyplot по формулам Эндрюса)

Отклонение рассчитанных значений от справочных данных [3, 6] не превышает 3-5%, что подтверждает высокую точность эмпирических моделей Эндрюса для данного класса сталей. Отрицательное значение точки (-140℃) указывает на то, что при охлаждении до комнатной температуры (20℃) мартенситное превращение не завершится полностью.

Доля мартенсита и твердость. Кинетика мартенситного превращения описывалась уравнением Койстинена-Марбургера [7], которое связывает объемную долю мартенсита (V_M) с температурой охлаждения (T) (5):

$$V_M = 1 - \exp\left[-\beta * (M_s - T)\right] \quad (5)$$

Расчет показал, что при охлаждении стали 45 до 20 °C объемная доля мартенсита составляет ~97%. Оставшиеся 3-5% приходится на остаточный аустенит (что согласуется с расчетной точкой M_f).

Именно наличие ~97% мартенсита отпуска объясняет экспериментально зафиксированную высокую твердость в диапазоне HRC 40–55 [1]. При этом низкий отпуск незначительно снизил твердость, но существенно повысил вязкость и пластичность материала [5].

Согласно справочным TTT-диаграммам [6], для образования мартенсита в стали 45 необходима скорость охлаждения выше критической ($V_{кр} \approx 150 - 200℃/с$). Построенная с помощью Python расчетная кривая охлаждения демонстрирует пересечение области мартенситного превращения при скоростях, превышающих Vкр, что подтверждает экспериментальную микроструктуру, полученную в работе [1].

Применение регрессионных моделей. Как показано в работах по регрессионному анализу [8, 9], использование готовых математических моделей, разработанных на основе сотен химических составов сталей, позволяет провести сравнительный анализ и спрогнозировать критические точки такие как, M_s, B_s, Ac_1, Ac_3, без необходимости формирования собственных экспериментальных датасетов. Подходы, описанные Лемзиковым А.В. и др. [11], подтверждают эффективность использования методов регрессионного анализа и нейронных сетей для прогнозирования структурных превращений и твердости в зависимости от охлаждения детали.

Анализ разброса механических свойств. Экспериментально зафиксированный разброс твердости (до 55 HRC) не является ошибкой измерения. Согласно классификации Н.Т. Гудцова и данным, приведенным в нашей предыдущей работе [1], этот разброс обусловлен реальными металлургическими факторами: влиянием скрытых примесей (O, N, H), вызывающих микроликвацию; локальной неоднородностью распределения цементита в структуре, что создает зоны с локально повышенной твердостью при индентировании.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты подтверждают, что комбинация классического эксперимента и современных эмпирических/термодинамических моделей является надежным инструментом анализа. В дальнейших наших работах планируется провести исследования по созданию полноценных предиктивных моделей, связывающих химический состав, параметры термической обработки и итоговые механические свойства конструкционных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Структурные особенности конструкционной стали 45 после термической обработки / Е. С. Козик, С. А. Корчагина, А. В. Королева [и др.] // Перспективные материалы и технологии (ПМТ-2025) : сборник докладов Национальной научно-технической конференции с международным участием, Москва, 07–12 апреля 2025 года. М. : МИРЭА – Российский технологический университет, 2025. С. 433–437. EDN ABJNKF.

[2] ГОСТ 1050-2013. Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия. М. : Стандартинформ, 2014.

[3] Гуляев, А. П. Металловедение / А. П. Гуляев. М. : Металлургия, 1986. 544 с.

[4] Thermo-Calc & DICTRA, computational tools for materials science / J. Andersson, T. Helander, L. Höglund, P. Shi, B. Sundman // Calphad. 2002. Vol. 26, No 2. P. 273–312.

[5] Материаловедение / Б. Н. Арзамасов [и др.]. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. 640 с.

[6] Попова, Л. Е. Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета-раствора в сплавах титана : справочник термиста / Л. Е. Попова, А. А. Попов. М. : Металлургия, 1991. 503 с.

[7] Empirical formulae for the calculation of some transformation temperatures / K. W. Andrews // Journal of the Iron and Steel Institute. 1965. Vol. 203. P. 721–727.

[8] A general equation prescribing the extent of the austenite-martensite transformation / D. P. Koistinen, R. T. Marburger // Acta Metallurgica. 1959. Vol. 7. P. 59–60.

[9] Regression analysis of critical temperatures and hardness prediction in steels [Electronic Resource] // Archives of Metallurgy and Materials. 2016. Vol. 2B. Mode of access : https://www.imim.pl/files/archiwum/Vol2B_2016/15.pdf. Date of access : 16.09.2026.

[10] Hardness prediction model for structural steels [Electronic Resource] // Metals. 2024. Vol. 14, No 8. Art. 881. Mode of access : https://www.mdpi.com/2075-4701/14/8/881. Date of access : 16.09.2026.

[11] Моделирование структурных превращений в углеродистых сталях / А. В. Лемзиков, Д. Г. Иванов, Н. В. Зимин, С. П. Кундас // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С, Фундаментальные науки. 2009. № 3. Mode of access : https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-strukturnyh-prevrascheniy-v-uglerodistyh-stalyah. Date of access : 16.09.2026.

MODELING THE MECHANICAL PROPERTIES OF STRUCTURAL MATERIALS VIA HEAT TREATMENT METHODS

Kozik E.S., Korchagina S.A, Koroleva A.V.

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation, korchaginasa@yandex.ru

Abstract: this paper presents a comprehensive study of the structural transformations and mechanical properties of structural steel 45 following quenching and low-temperature tempering. Experimental data on microstructure and hardness were verified using computational thermodynamics and kinetic modeling methods. The Fe-C phase diagram was constructed using Thermo-Calc software, critical points were calculated based on Andrews' empirical formulas, and martensitic transformation kinetics were described using the Koistinen-Marburger model. The calculated data were found to be in good agreement with experimental results and reference data. The causes of hardness value scatter and the prospects for using regression models to predict microstructure are discussed.

Keywords: steel 45, heat treatment, modeling, martensitic transformation, TTT diagram.

УДК 004.021

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЛАГОСОДЕРЖАЩИХ ЭКРАНИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Сухоцкий В.В., Пухир Г.А., Насонова Н.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, such998slava@outlook.com

Аннотация: для разработки электромагнитных экранов используются различные материалы, обладающие большими потерями в области пропускания электромагнитных волн. В последнее время появились разработки новых типов экранов на основе влагосодержащих материалов. В работе приводится краткое описание процесса моделирования свойств таких материалов на примере пористого наполнителя, пропитанного водным раствором хлорида кальция, распределенного в кремнийорганическом связующем. Показано, что путем рассмотрения влагосодержащего композита как многофазной структуры, можно рассчитать его диэлектрические параметры и оптимизировать параметры эффективности экранирования конструкции на его основе.

Ключевые слова: электромагнитный экран, водосодержащий композиционный материал, диэлектрическая проницаемость, моделирование.

I. ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование параметров композиционного материала при конструировании электромагнитных экранов позволяет сокращать затраты времени и сырья на экспериментальные образцы, а также повысить эффективность готовых конструкций за счет решения задачи оптимизации с учетом требуемых выходных параметров. Зная закономерности взаимодействия компонентов материала с электромагнитным излучением определенной мощности и частоты, а также между собой, можно получить математическую модель, позволяющую учитывать множество параметров композита. При разработке новых экранов электромагнитного излучения (ЭМИ) происходит подбор материалов, пригодных для использования в конкретном сценарии. Как правило, выбор материала экрана проводится исходя из обеспечения требуемой эффективности экранирования в заданном диапазоне частот при определенных ограничениях, связанных с технологическими и эксплуатационными свойствами готовой конструкции.

В настоящее время активно разрабатываются экраны на основе композиционных влагосодержащих материалов, так как вода – универсальный растворитель, может смешиваться с полярными веществами и позволяет создавать электролиты, обладающие свойством поглощения ЭМИ микроволнового диапазона. Для создания устойчивого материала с водным электролитом внутри используют влагопоглощающие материалы и каркас, способный изолировать воду и задерживать её внутри влагопоглощающих материалов.

Экспериментальные исследования показывают [1], что в диапазоне частот 8…12 ГГц в порошковых силикагелевых материалах при изменении влагосодержания от 20 до 55 мас. % величина ослабления может достигать 20 дБ, а коэффициент отражения от -12 до -5 дБ. В порошковых бентонитовых материалах повышение влагосодержания от 20 до 45 мас. % приводит к увеличению ослабления до 16 дБ, при коэффициенте отражения -8...-4,5 дБ. Многослойные конструкции на основе таких материалов позволяют увеличивать ослабление ЭМИ до 30 дБ и выше в диапазоне частот 8…12 ГГц.

Как следствие, эффективность влагосодержащих материалов для экранирования электромагнитного излучения высока, а разработка модели расчета параметров таких композитов актуальна.

II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ КОМПОЗИТА

Свойства диэлектрика на переменном токе описываются понятием комплексной диэлектрической проницаемости, состоящей из действительной и мнимой частей, которые обычно зависят от частоты. В радиочастотном диапазоне наблюдается рост действительной части комплексной диэлектрической проницаемости полярных диэлектриков за счет дипольной поляризации [2]. Это приводит к энергетическим потерям, что можно эффективно использовать при экранировании электромагнитного излучения СВЧ-диапазона. Увеличение важности влагосодержащих материалов значительно увеличивает тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$.

Поглощение энергии электромагнитного излучения в диапазоне частот до 300 ГГц в таких структурах описывается следующим уравнением [3]:

$$\varepsilon^* = \left(\varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1+\omega^2\tau^2}\right) + j\left(\frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}\right)1 + \omega\tau, \quad (1)$$

где ε_0, ε_∞ – статическое и высокочастотное значение диэлектрической проницаемости;

τ – время релаксации молекул воды, с;

ω – частота внешнего переменного электрического поля, рад/с.

Для моделирования влагосодержания материала на основе водного раствора хлорида кальция необходимо рассмотреть растворный наполнитель как многофазную структуру с распределением раствора в порах сорбента, выполняющего роль несущей основы жидкой фазы, где влагосодержание может быть описано через термодинамические параметры системы. Представленный алгоритм учитывает параметры одной поры сорбента, заполненной раствором, монослоя и всего композита.

Используя данные расчетов по формулам 2-3, можно найти эквивалентную массу соли (кг) и эквивалентную массовую долю соли в растворе, соответственно:

$$\mathrm{m_{sol,eq}} = \frac{\mathrm{m_{H_2O}\cdot M_{sol}\cdot(1-RH)}}{\mathrm{M_{H_2O}\cdot RH}}, \qquad \xi_{\mathrm{eq}} = \frac{\mathrm{m_{sol,eq}}}{\mathrm{m_{sol,eq}+m_{H_2O}}}, \quad (2)$$

где $\mathrm{m_{H_2O}} = 1$ кг – допущенная масса воды в растворе,

$\mathrm{M_{sol}} = 0.111$ кг/моль – молярная масса хлорида кальция;

$\mathrm{M_{H_2O}} = 0.018$ кг/моль – молярная масса молекулы воды.

Находим объём раствора с максимально возможной массовой долей соли в порах гранул ($м^3$):

$$\mathrm{V_{sol,req}} = \frac{\mathrm{m_{sol,req}}}{\rho_{\mathrm{sol}}(\xi_{\mathrm{eq}},\mathrm{T_{air}})} = \frac{\xi_0\cdot\rho_{\mathrm{sol}}(\xi_0,\mathrm{T_{air}})\cdot\phi_{\mathrm{p}}\cdot\varphi_{\mathrm{g}}}{\xi_{\mathrm{eq}}\cdot\rho_{\mathrm{sol}}(\xi_{\mathrm{eq}},\mathrm{T_{air}})}. \quad (3)$$

Находим объем воды, поглощенной связующим из раствора, которым пропитаны гранулы ($м^3$):

$$\Delta\mathrm{V_{sol}} = \frac{\mathrm{m_{mono}}}{\rho_{\mathrm{H_2O}}\cdot(1-\xi_{\mathrm{eq}})} = \frac{\rho_{\mathrm{H_2O}}\cdot\delta_{\mathrm{m}}\cdot\mathrm{A_{ext}}}{\rho_{\mathrm{H_2O}}\cdot(1-\xi_{\mathrm{eq}})} = \frac{\delta_{\mathrm{m}}\cdot\mathrm{A_{ext}}}{(1-\xi_{\mathrm{eq}})} = \frac{6\cdot\delta_{\mathrm{m}}\cdot\varphi_{\mathrm{g}}}{\mathrm{d}\cdot(1-\xi_{\mathrm{eq}})}. \quad (4)$$

где $\delta_{\mathrm{m}} = 2.9\times10^{-10}$м – толщина монослоя воды;

$\rho_{\mathrm{H_2O}}$ – плотность насыщенного водяного пара при заданной температуре

Рассчитанные параметры позволяют получить итоговые коэффициенты заполнения пор раствором и воздухом, соответственно:

$$\mathrm{C_{pore}} = \min\left(1, \frac{\max(0,\mathrm{V_{sol,req}}-\Delta\mathrm{V_{sol}})}{\mathrm{V_p}}\right), \qquad \mathrm{C_{air}} = 1 - \mathrm{C_{pore}}. \quad (5)$$

Представленная математическая модель была обработана в программной среде Matlab [4] и получена зависимость содержания раствора в порах готового материала (рис. 1).

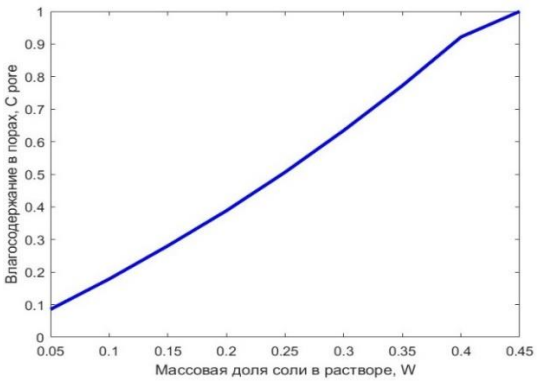


Рисунок 1. Зависимость итогового коэффициента заполнения пор раствором от концентрации соли в растворе

III. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ КОМПОЗИТА

Для моделирования диэлектрических параметров итогового материала необходимо учитывать влагосодержание материала и особенности взаимодействия каждого компонента композиционного материала электромагнитного экрана с электромагнитным излучением определенной частоты.

Для растворного наполнителя необходимо рассчитать:

1) коэффициент преломления раствора хлорида кальция:

$$n = n_{H_2O} + n_{добав} \cdot \xi_0 - 100 \cdot \Delta n \cdot {\xi_0}^2; \quad (6)$$

2) проводимость ионов хлорида кальция в растворе (См):

$$\sigma_{CaCl_2} = \frac{\xi_0 \cdot 2 \cdot e_0 \cdot \left(U_{Ca^{2+}} + U_{Cl^-}\right) \cdot \rho_{sol}(\xi,T) \cdot 10^{-3}}{M_{sol}}; \quad (7)$$

3) проводимость ионов воды в растворе (См):

$$\sigma_{H_2O} = \frac{(1-\xi_0) \cdot \xi_0 \cdot 2 \cdot e_0 \cdot (U_{H^+} + U_{OH^-}) \cdot \rho_{sol}(\xi,T) \cdot 10^{-3}}{M_{sol}}; \quad (8)$$

4) время релаксации молекул воды в растворе (с):

$$t_0 = \frac{4 \cdot \mu_{вязкости\ р-ра} \cdot d_{молекулы\ воды}}{k \cdot T_{air}}; \quad (9)$$

Действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости раствора может быть рассчитана по формуле:

$$\varepsilon' = \left(\frac{t_0 \cdot c}{m} + \sqrt{1 - \left(\frac{c}{l \cdot f}\right)^2}\right)^2 + \left(\frac{c}{l \cdot f}\right)^2; \quad (10)$$

Комплексная диэлектрическая проницаемость раствора тогда определяется как:

$$\varepsilon_{el}{}^* = \varepsilon' + \frac{\varepsilon' - n^2}{1 + (i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t_0)^{1-\alpha_{неидеал}}} - \frac{i \cdot (\sigma_{CaCl_2} + \sigma_{H_2O}) \cdot m}{\varepsilon_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot l \cdot n}; \quad (11)$$

Находим комплексную диэлектрическую проницаемость поры гранулы с раствором и воздухом:

$$\varepsilon_{pore}{}^* = \frac{(-1) \cdot (\varepsilon_{el}{}^* - 2 - 3\varepsilon_{el}{}^* \cdot C_{pore} + 3 \cdot C_{pore})}{2}. \quad (12)$$

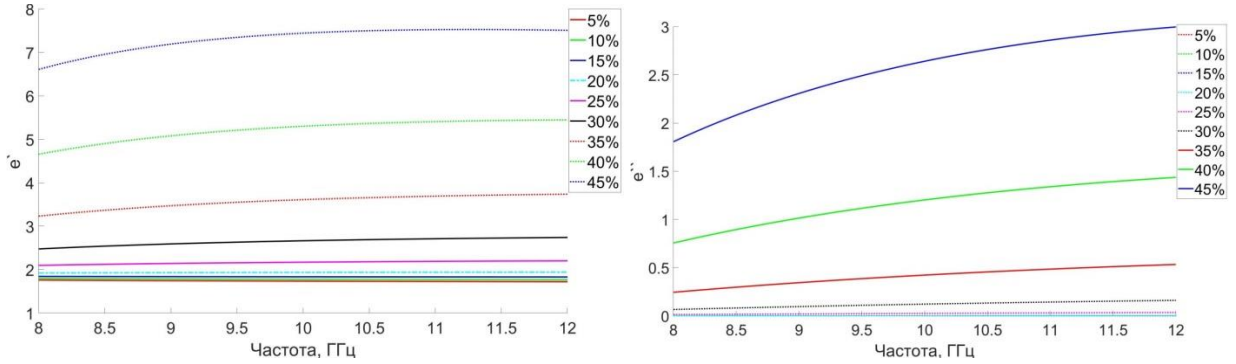
Вычисляем комплексную диэлектрическую проницаемость 1 гранулы, пропитанной раствором:

$$\varepsilon_{gr}{}^* = \frac{(-1) \cdot (\varepsilon_{pore}{}^* - 2 \cdot \varepsilon_{silic} - 3 \cdot \varepsilon_{pore}{}^* \cdot \phi_p + 3 \cdot \varepsilon_{silic} \cdot \phi_p)}{2}. \quad (13)$$

Для готового композиционного материала комплексная диэлектрическая проницаемость рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon_{comp}{}^* = \frac{(-1) \cdot (\varepsilon_{gr}{}^* - 2 \cdot \varepsilon_{silic} - 3 \cdot \varepsilon_{gr}{}^* \cdot \varphi_g + 3 \cdot \varepsilon_{silic} \cdot \varphi_g)}{2}; \quad (14)$$

Диэлектрические параметры материала также были обработаны в программной среде Matlab. Результаты моделирования представлены на рисунке 2 в виде частотных зависимостей в диапазоне 8 – 12 ГГц.



а) б)

Рисунок 2. Частотные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости (действительная часть (а) и мнимая часть (б)) образцов композитов с различной концентрацией растворного наполнителя пор (от 5 до 45 масс.%) в диапазоне 8 – 12 ГГц

Результаты моделирования коррелируют с данными экспериментальных исследований [5] образцов экранирующих композиционных материалов на основе пористого силикагелевого материала, пропитанного водным раствором хлорида кальция различной концентрации (массовая доля соли – 5-45 % с шагом 5%), распределенного в кремнийорганическом связующем (объемная доля гранул в материале составляет 50 %). Пористость гранулы диаметром 2 мм была принята за 60 %.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов моделирования и сравнения с экспериментальными данными измерений комплексной диэлектрической проницаемости композиционных влагосодержащих материалов можно сделать вывод, что закономерности диэлектрических параметров композита требуют знания особенности его структуры и учета всех компонентов такой системы. Так, для влагосодержащих материалов важно учитывать распределение влаги в порах сорбента и физико-химические свойства раствора. Данные результаты могут быть приближены к реальным значениям и на их основе можно реализовать модель расчета экранирующих характеристик ослабления и отражения электромагнитного излучения для оптимизации задачи конструирования эффективных электромагнитных экранов.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Водосодержащие пенополимерные материалы для создания экранов электромагнитного излучения / Н. В. Колбун, Х. М. Альлябад, Л. М. Лыньков – Мн. : БГУИР, 2008. – с.87-92.

[2] Хиппель, А. Диэлектрики и их применение : Пер. с англ. под ред. Д.М. Казарновского / А. Хиппель. – М. : Государственное энергетическое издательство, 1959. – 80 с.

[3] Бензарь, В.К. Техника СВЧ-влагометрии / В.К.Бензарь. – Минск: Вышэйшая школа, 1974. – 374 с.

[4] Пакет прикладных программ Matlab [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.mathworks.com. – Дата доступа: 15.09.2026.

[5] Насонова Н.В. Взаимодействие электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с влагосодержащими материалами на основе различных пористых матриц / Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 14-й Междунар. конф., посвящ. 100-летию Белорус. гос. ун-та, Минск, Беларусь, 21–24 сент. 2021 г. / Белорус. гос.ун-т; редкол.: В. В. Углов (гл. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2021. – С. 330-334.

MODELING OF THE DIELECTRIC PROPERTIES OF MOISTURE-CONTAINING SHIELDING MATERIALS

V. Sukhotski, H. Pukhir, N. Nasonova

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
such998slava@outlook.com

Abstract: various materials exhibiting high losses in the electromagnetic wave transmission range are used to develop electromagnetic shields. Recently, designs of new types of shields based on moisture-containing materials have emerged. This article provides a brief description of the process of modeling the properties of such materials using the example of a porous filler impregnated with aqueous calcium chloride solution distributed in an organosilicon binder. It is shown, that by considering the moisture-containing composite as a multiphase structure, it is possible to calculate its dielectric parameters and optimize the shielding efficiency parameters of a structure based on it.

Keywords: electromagnetic shield, moisture-containing composite material, permittivity, modeling.

УДК 621.315.5/.6

ФОРМИРОВАНИЕ АНТИОТРАЖАЮЩИХ СЛОЕВ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Ковальчук Н.Г.[1], Дронина Е.А.[1], Прищепа С.Л.[1], Томашевич Л.П.[1], Петров А.В.[2], Каланда Н.А.[2], Лазарук С.К.[1]

[1]Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, n.kovalchuk@bsuir.by

[2]НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Республика Беларусь

Аннотация: предложен метод создания антибликовых слоев на основе одностенных углеродных нанотрубок (ОСУНТ). Формирование пленок ОСУНТ проводилось при температуре до 200 °С методом химического парофазного осаждения (ХПО) с использованием раствора железосодержащего катализатора. По данным электронной микроскопии и КР-спектроскопии, полученное покрытие представляет собой массив из случайно ориентированных ОСУНТ. Анализ зеркального отражения подтвердил высокую эффективность покрытия, задерживающего более 99% падающего излучения.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки; наноструктуры; химическое парофазное осаждение; спектры отражения; спектры комбинационного рассеяния света; антиотражающие покрытия.

I. ВВЕДЕНИЕ

Прогресс в области нанотехнологий увеличил интерес научного сообщества к созданию функциональных слоев и тонкопленочных структур. Важной областью исследований являются антиотражающие (светопоглащающие) материалы. Антиотражающие покрытия используются для повышения эффективности светотермального преобразования в солнечной энергетике, в микросистемах приема оптического излучения космических аппаратов (микросистемы дистанционного зондирования поверхности Земли), в военной промышленности в качестве маскировки, а также для управления световым сигналом в различных оптоэлектронных устройствах [1-14].

В данной работе представлены результаты формирования антиотражающих покрытий из углеродных нанотрубок. Модифицированные слои формировались на металлических подложках методом ХПО с использованием прекурсора на основе раствора ферроцена в этаноле.

II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез покрытий на основе ОСУНТ осуществлялся по методике, описанной в работе [15]. Массив из случайно ориентированных нанотрубок формировался непосредственно на подложках методом ХПО путем каталитического пиролиза жидкого углеводорода. Экспериментальная установка представляла собой систему, состоящую из горизонтальной трубчатой печи (длиной 340 мм), кварцевой трубки (длина 1500 мм) и распылителя. Раствор прекурсора приготавливали путем растворения при комнатной температуре соответствующего количества порошка ферроцена ($Fe(C_5H_5)_2$, чистота 98%) в этаноле (C_2H_5OH, чистота 99,8%) с последующим механическим перемешиванием в течение 5 минут. Готовый раствор помещали в шприцевой дозатор с электроприводом, который обеспечивал контролируемую скорость подачи 0,2 мл/мин. Инертную среду и транспорт паров обеспечивал постоянный поток аргона (99,99%) с расходом 100 см³/мин, задаваемый регулятором расхода газа. Рабочая зона реактора нагревалась до 1050 °С в течение 30 минут. По достижении термической стабилизации активировали подачу реагента; суммарный объем впрыскиваемого прекурсора варьировался от 1,5 до 3,0 мл. Принципиальная схема ХПО-установки и распределение температур в реакторе приведены на рисунке 1.

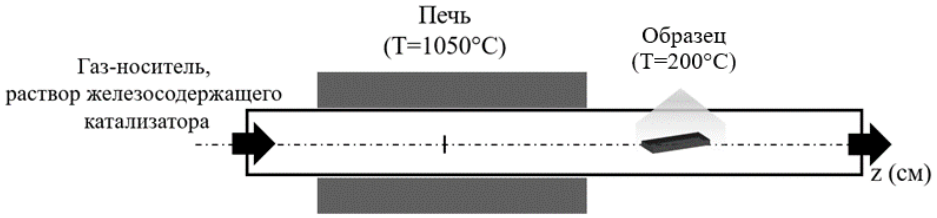


Рисунок 1. Схема экспериментальной ХПО установки

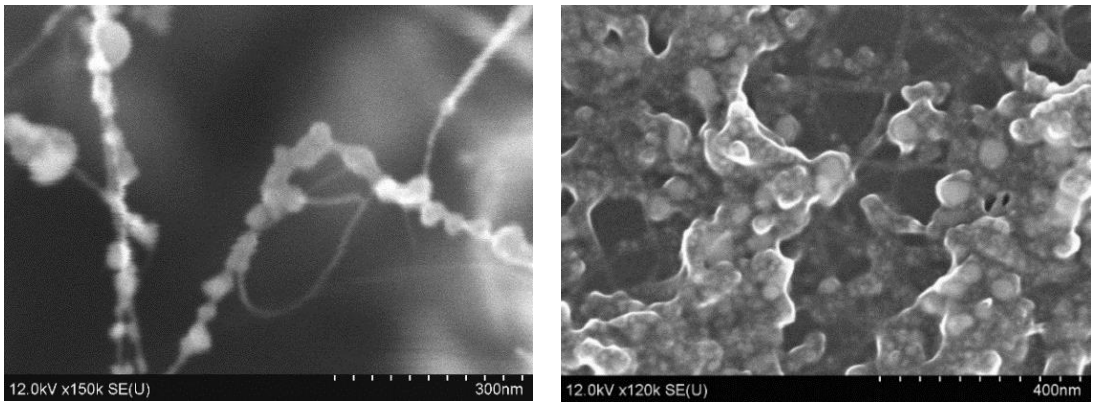
Продукты пиролиза – одностенные углеродные нанотрубки – переносились потоком аргона из высокотемпературной зоны реактора в его охлаждаемую часть, где происходило их осаждение

непосредственно на поверхность образцов (рис. 1). Температурный режим в области подложки выступает определяющим фактором, контролирующим кинетику роста, итоговую плотность и структурные характеристики формируемого массива ОСУНТ. Серия экспериментальных тестов показала, что оптимальные по структуре и свойствам антиотражающие слои формируются в низкотемпературной области реактора (до 200 °C).

После охлаждения системы до комнатной температуры образцы с пленкой ОСУНТ подвергали обработке композиционным раствором лака ХС-76 в толуоле (концентрация 10 г/л) методом окунания с последующей сушкой при 50 °C. Данная процедура выполнялась с целью повышения адгезионной прочности на границе «пленка – подложка» и уплотнения наноструктурированного слоя. Оптические свойства покрытий исследовались на спектрометре МС 122А; регистрация спектров проводилась как в геометрии зеркального, так и диффузного отражения для корректного учета рассеянного излучения.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Морфологические и структурные свойства пленки из углеродных нанотрубок исследовали с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, Hitachi S4800) и спектрометрии комбинационного рассеяния света (Confotec NR 500). На рисунке 2 показано изображение типичного образца, полученного методом сканирующей электронной микроскопии. Оно демонстрируют хаотично ориентированную, прерывистую наноструктурную сеть, где отдельные трубки имеют тенденцию переплетаться друг с другом, образуя пучки. На рисунке 2б представлено СЭМ-изображение сформированного покрытия образца после окунания в органический раствор и финальной сушки.



а) б)

Рисунок 2. СЭМ изображение пленки из ОСУНТ а) до обработки б) после обработки раствором толуола и ХС-76

Анализ спектров комбинационного рассеяния света (КРС) выполнялся при комнатной температуре путем картирования участков поверхности размером 48 × 48 мкм² с шагом 1 мкм по осям X и Y. Возбуждение спектров осуществлялось лазерами с длинами волн 785, 633 и 473 нм через объектив с увеличением 40×; время экспозиции для каждой точки составляло 5 с. Мощность лазера тщательно контролировали, чтобы избежать нагрева образца и, как следствие, смещения положения и формы регистрируемых полос. Профили и интенсивность пиков аппроксимировали с помощью функции Лоренца. Выделение компонент радиально-дыхательной моды (РДМ) проводилось после коррекции базовой линии и вычитания фона.

Типичные КР-спектры сформированных ОСУНТ-пленок для трех длин волн лазера приведены на рисунке 3. Ключевыми маркерами ОСУНТ в полученных спектрах служат наличие низкочастотной радиально-дыхательной моды (РДМ) и характерное расщепление G-полосы вблизи 1580 $см^{-1}$. Если G-полоса в целом присуща всем углеродным sp2-системам, то ее расщепление на высокочастотную G+ (колебания атомов вдоль оси трубки) и низкочастотную G– (колебания по окружности) компоненты специфично именно для одностенных трубок. Оно обусловлено нарушением симметрии тангенциальных колебаний при сворачивании графеновой плоскости в цилиндр и одномерным квантовым ограничением фононов. В свою очередь, появление моды РДМ выступает прямым физическим критерием, однозначно подтверждающим присутствие одностенных углеродных нанотрубок в структуре покрытия.

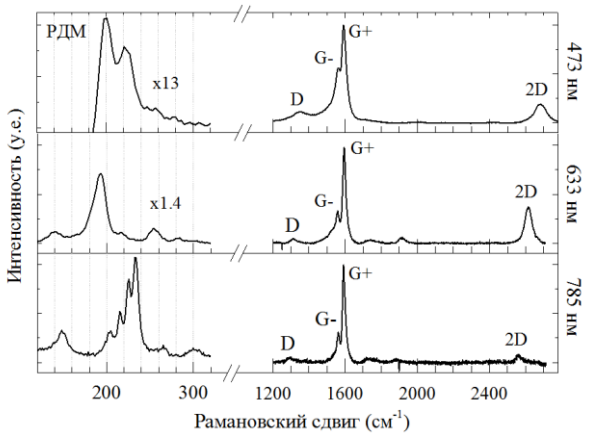
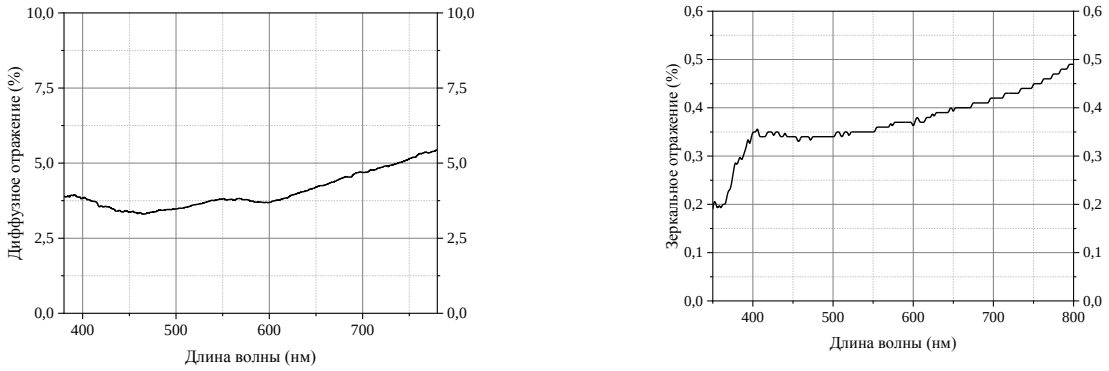


Рисунок 3. Типичные спектры КРС пленки из ОСУНТ

На рисунке 4 представлены спектры отражения сформированных антиотражающих покрытий, измеренных в режимах зеркального отражения и диффузного рассеяния света. Как видно из рисунка 5 при зеркальном отражении регистрируется 0,2-0,5 % от падающего светового сигнала. Измерение диффузионного отражения показало 4-5 % от падающего светового потока, что свидетельствует о диффузном рассеянии света сформированным наноструктурированным покрытием.



а) б)

Рисунок 4. Спектры отражения антиотражающих покрытий:

а – режим диффузного рассеяния, б – режим зеркального отражения

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен эффективный метод создания антиотражающих покрытий на основе углеродных нанотрубок. Технология основывается на процессе химического парофазного осаждения, реализуемом путем пиролитического разложения раствора железосодержащего катализатора (ферроцена) в инертной среде аргона. Исследование оптических свойств показало, что коэффициент зеркального отражения полученных слоев в видимом диапазоне спектра составляет менее 1%. Столь низкий уровень отражения подтверждает высокую светопоглощающую способность сформированных наноструктур, что открывает широкие перспективы для их интеграции в современные оптоэлектронные и антибликовые устройства.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ проект № Т25ИНДА-004 (формирование антиотражающих покрытий), проект № Ф25-МЭ-016 (формирование углеродных нанотрубок).

ЛИТЕРАТУРА

[1] Monica, S. La Progress in the field of integrated optoelectronics based on porous silicon / Monica S. La, G. Maiello, A. Ferrari, G. Masini, S. Lazarouk, P. Jaguiro et al. // Thin Solid Films. – 1997. – Vol. 297, № 1-2. – P. 265-267.

[2] Lazarouk, S. K. 3D Silicon Photonic Structures Based on Avalanche LED with Interconnections Through Optical Interposer / S. K. Lazarouk, A. A. Leshok, T. A. Kozlova, A. V. Dolbik, L. D. Vi, V. K. Ilkov et al. // International Journal of Nanoscience. – 2019. – Vol. 18, № 3-4. – Art. 1940091.
[3] Lazarouk, S. Visible Electroluminescence from Al-Porous Silicon Reverse Bias Diodes Formed on the Base of Degenerate n-Type Silicon / S. Lazarouk, V. Bondarenko, P. Pershukevich, S. Monica La, G. Maiello // MRS Online Proceedings Library Archive. – 1994. – Vol. 358. – P. 659-664.
[4] Лазарук С.К. Электролюминесценция наноструктурированного кремния в матрице анодного оксида алюминия / С.К. Лазарук, Д.А. Сасинович, П.С. Кацуба, В.А. Лабунов, В.Е. Борисенко // Физика и техника полупроводников. – 2007. – Т. 41. – С. 1126-1129.
[5] Bertolotti M. Porous silicon obtained by anodization in the transition regime / M. Bertolotti, F. Carassiti, E. Fazio, A. Ferrari, S. Monica La, S. Lazarouk et al. // Thin Solid Films. – 1995. – Vol. 255, № 1-2. – P. 152-154.
[6] Lazarouk S. Visible light from aluminum-porous silicon Schottky junctions / S. Lazarouk, P. Jaguiro, S. Katsouba, S. Monica La, G. Maiello, G. Masini et al. // Thin Solid Films. – 1996. – Vol. 276, № 1-2. – P. 168-170.
[7] Lazarouk S. Stable electroluminescence from reverse biased n-type porous silicon–aluminum Schottky junction device / S. Lazarouk, P. Jaguiro, S. Katsouba, G. Masini, S. Monica La, G. Maiello et al. // Applied Physics Letters. – 1996. – Vol. 68. – P. 2108-2110.
[8] Лазарук С.К. Влияние локальной напряженности электрического поля на формирование упорядоченной структуры пористого анодного оксида алюминия / С.К. Лазарук, П.С. Кацуба, А.А. Лешок, В.Б. Высоцкий // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 65. – № 9. – С. 86–90.
[9] Lazarouk S. Optical characterization of reverse biased porous silicon light emitting diode / S. Lazarouk, S. Katsouba, A. Tomlinson, S. Benedetti, C. Mazzoleni, V. Mulloni, G. Mariotto, L. Pavesi // Materials Science and Engineering: B. – 2000. – Vol. 69-70. – P. 114–117.
[10] Jaguiro P. Si-based optoelectronic couple / P. Jaguiro, P. Katsuba, S. Lazarouk, S. Moore, A. Smirnov // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. – 2009. – Vol. 41, № 6. – P. 1094-1096.
[11] Берашевич, Ю.А. Электролюминесценция в пористом кремнии при обратном смещении барьера Шоттки / Ю.А. Берашевич, С.К. Лазарук, В.Е. Борисенко // Физика и техника полупроводников. – 2006. – Т. 40. № 2. – С. 240–245.
[12] Jaguiro P. Si-based emissive microdisplays / P. Jaguiro, P. Katsuba, S. Lazarouk, M. Farmer, A. Smirnov // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. – 2009. – Vol. 41, № 6. – P. 927-930.
[13] Katsuba P. Stable electroluminescence of nanostructured silicon embedded into anodic alumina / P. Katsuba, P. Jaguiro, S. Lazarouk, A. Smirnov // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. – 2009. – Vol. 41, № 6. – P. 931-934.
[14] Lazarouk S.K. Room-temperature formation of erbium-related luminescent centers in anodic alumina / S.K. Lazarouk, A.V. Mudryi, V.E. Borisenko // Applied Physics Letters. – 1998. – Vol. 73, № 16. – P. 2272-2274.
[15] Dronina L. A. Properties of single-walled carbon nanotube film/Si heterojunctions fabricated in situ / L. A. Dronina, N. G. Kovalchuk, I. V. Komissarov, A. L. Danilyuk et al. // Applied Nanoscience. – 2025. – Vol. 15, № 2.

PRODUCTION OF ANTI-REFLECTIVE LAYERS BASED ON CARBON NANOTUBE

N.G. Kovalchuk[1], L.A. Dronina[1], S.L. Prischepa[1], L.P. Tomashevich[1], A.V. Petrov[2], N.A. Kalanda[2], S.K. Lazarouk[1]

[1] Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus, n.kovalchuk@bsuir.by

[2]Scientific-Practical Materials Research Centre of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Abstract: a method for creating antireflective layers based on single-wall carbon nanotubes (SWCNTs) is proposed. The structure was deposited at temperatures up to 200°C using chemical vapor deposition (CVD) with a liquid iron-containing catalyst. Electron microscopy and Raman spectroscopy data show that the resulting coating consists of a randomly oriented array of SWCNTs. Specular reflectance analysis confirmed the coating's high efficiency, blocking more than 99% of incident radiation.

Keywords: carbon nanotubes; nanostructures; chemical vapor deposition; reflectance spectra; Raman spectra; antireflection coatings.

УДК 678.744

РАЗМЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ СТЕКЛОВАНИИ НАНОЧАСТИЦ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА

Баглов А.В.[1,2], Алексеенко А.А.[1], Ларькин А.В.[1], Хорошко Л.С.[1,2]

[1]Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь, baglov@bsu.by

[2]Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь

Аннотация: методами молекулярной динамики исследованы изолированные аморфные наночастицы полиэтилентерефталата диаметром 4 и 6 нм. Температура стеклования определялась по излому температурной зависимости потенциальной энергии при нагреве и охлаждении. Для частицы 4 нм искомые температуры составили 471,5 и 372,7 К, для частицы 6 нм - 447,1 и 432,2 К соответственно. При увеличении диаметра наночастиц гистерезис сократился с 101 до 14,9 К при сохранении ближнего структурного порядка. Результат указывает на чувствительность релаксации к отношению поверхности к объему и требует дальнейшей проверки на серии независимых траекторий.

Ключевые слова: полиэтилентерефталат, наночастицы, молекулярная динамика, стеклование, размерный эффект.

I. ВВЕДЕНИЕ

Стеклование аморфного полимера представляет собой кинетический переход, связанный с резким замедлением сегментальной подвижности. Для наноразмерных объектов его наблюдаемое положение и ширина переходной области могут зависеть не только от химического строения и тепловой предыстории, но и от доли цепных сегментов, находящихся вблизи свободной поверхности. Изучение термозависимого поведения полимеров важно для понимания их свойств при встраивании в композитные системы, а также с точки зрения повышения экологичности процессов производства и снижения генерируемых им микро- и нанопластиков. Полиэтилентерефталат (ПЭТ) является удобной модельной системой: жесткие ароматические фрагменты и сложноэфирные связи обусловливают выраженную конформационную релаксацию в диапазоне стеклования.

Целью данной работы являлось установление влияния изменения линейного размера изолированной аморфной наночастицы ПЭТ на температурные зависимости потенциальной энергии (E_{pot}) и операционное значение температуры стеклования (T_g). Под размерным эффектом далее понимается изменение отклика вследствие соотношения поверхностной и объемной частей частицы; электронные эффекты квантового ограничения в данной классической модели не рассматриваются.

II. МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Моделирование реализовали в пакете LAMMPS [1]. Рассматривали квазисферические изолированные частицы ПЭТ диаметром 4 и 6 нм, содержащие 3190 и 10 758 атомов соответственно. Начальные конфигурации со средней плотностью 1,338 г/см^3 формировали в PACKMOL, после чего выполняли минимизация энергии методом сопряженных градиентов. Взаимодействия описывали полноатомным силовым полем OPLS-AA [2].

После предварительной релаксации при 290 К в течение 50 пс проводили линейный нагрев в диапазоне температур 290–600 К и последующее охлаждение длительностью по 500 пс в NVT-ансамбле (каноническом). Шаг интегрирования составлял 1,0 фс, скорость изменения температуры – $6{,}2\times10^{11}$ К/с. Значение T_g для каждой ветви определялось как точка пересечения двух линейных аппроксимаций $E_{pot}(T)$, соответствующих низко- и высокотемпературному режимам. В силу высокой скорости термоцикла полученные значения рассматриваются как операционные характеристики данного молекулярно-динамического протокола, а не как прямые оценки экспериментальной температуры стеклования объёмного ПЭТ.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках принятого для моделирования расчетного протокола увеличение размера наночастицы ПЭТ сопровождается существенным сужением температурного гистерезиса. На обеих температурных ветвях $E_{pot}(T)$ обнаружен излом, характерный для смены режима конфигурационной релаксации. Полученные параметры приведены в таблице 1. Для частицы диаметром 4 нм разность между температурами стеклования при нагреве и охлаждении составляет 101 К. При переходе к частице 6 нм она уменьшается до 14,9 К.

Изменение T_g при увеличении размера наночастицы на ветви охлаждения с 372,7 до 432,2 К согласуется с гипотезой о меньшем вкладе свободной поверхности в релаксацию более крупной частицы. Для наночастицы 4 нм относительная доля поверхностных сегментов выше, возникающий вблизи границы раздела с вакуумом избыток свободного объема может понижать барьеры торсионных перестроек. Однако имеющихся двух размеров и по одной траектории на систему недостаточно для строгого выделения поверхностного вклада из эффектов начальной конфигурации и неравновесной тепловой истории. Для количественного установления зависимости необходимы независимые реализации начальных конфигураций и несколько промежуточных размеров.

Таблица 1. Операционные значения T_g

Диаметр, нм	T_g при нагреве, К	T_g при охлаждении, К	ΔT_g, К
4	471,5	372,7	101,0
6	447,1	432,2	14,9

Сравнение радиальных функций распределения для обеих частиц в области ближних межатомных расстояний не выявило заметного смещения основных максимумов. Таким образом, наблюдаемая размерная чувствительность относится прежде всего к коллективной конформационной релаксации и соотношению поверхностной и объемной областей, а не к изменению локальной химической геометрии. Это согласуется с общим представлением о влиянии свободных границ на стеклование полимерных наносистем [3].

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом молекулярной динамики исследовано стеклование изолированных аморфных наночастиц ПЭТ диаметром 4 и 6 нм. В обоих случаях выявлен температурный гистерезис, однако его величина уменьшается с 101,0 до 14,9 К при увеличении диаметра наночастиц, ближний структурный порядок сохраняется. Наблюдаемое различие обусловлено ростом роли объемной части и уменьшением относительного вклада свободной поверхности в более крупной частице. Вывод о механизме является предварительным: его проверка требует статистического усреднения по независимым траекториям и расширения размерного ряда.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа поддержана в рамках задания 3.1.14.2 ГПНИ «Конвергенция 2030».

ЛИТЕРАТУРА

[1] Plimpton, S. Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics / S. Plimpton // Journal of Computational Physics. 1995. Vol. 117, No. 1. P. 1-19. https://doi.org/10.1006/jcph.1995.1039

[2] Jorgensen, W. L. Development and Testing of the OPLS All-Atom Force Field on Conformational Energetics and Properties of Organic Liquids / W. L. Jorgensen, D. S. Maxwell, J. Tirado-Rives // Journal of the American Chemical Society. 1996. Vol. 118, No. 45. P. 11225-11236. https://doi.org/10.1021/ja9621760

[3] Keddie, J. L. Size-Dependent Depression of the Glass Transition Temperature in Polymer Films / J. L. Keddie, R. A. L. Jones, R. A. Cory // Europhysics Letters. 1994. Vol. 27, No. 1. P. 59-64. https://doi.org/10.1209/0295-5075/27/1/011

SIZE EFFECTS IN THE GLASS TRANSITION OF POLYETHYLENE TEREPHTHALATE NANOPARTICLES

A. Baglov[1,2], A. Alekseenko[1], A. Larkin[1], L. Khoroshko[1,2]

[1]Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus, baglov@bsu.by

[2] Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Abstract: molecular-dynamics simulations of isolated amorphous polyethylene terephthalate nanoparticles with diameters of 4 and 6 nm were performed. The glass-transition temperature was determined from a break in the potential-energy temperature dependence during heating and cooling. The 4 nm particle gave T_g values of 471.5 and 372.7 K, whereas the 6-nm particle gave 447.1 and 432.2 K, respectively. Increasing the particle size reduced the thermal hysteresis from 101 to 14.9 K without a detectable change in short-range structure. The result indicates a sensitivity of structural relaxation to the surface-to-volume ratio and should be verified using independent trajectories.

Keywords: polyethylene terephthalate, nanoparticles, molecular dynamics, glass transition, size effect.

УДК 666.65

РАЗРАБОТКА МИКРОВОЛНОВОГО КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ С-ДИАПАЗОНА

Базарова В.Е., Акиньшин И.Д., Хрусталев А.Н., Арбанас Л.А., Верхова Е.Д., Смирнова А.А, Серова Е.К., Смирнов А.В

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация, BazarovaVE@yandex.ru

Аннотация: в работе исследованы твёрдые растворы $Ba_{1-x}Sr_x(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ как перспективные высокодобротные керамические материалы для СВЧ-устройств С-диапазона. Определены оптимальные условия синтеза компонентов BZN и SZN в интервале температур 900 – 1100 °С и рассчитаны параметры элементарной ячейки. Получены и исследованы образцы керамики твердого раствора. Показано, что частичное замещение Ba^{2+} на Sr^{2+} (при x = 0,3–0,4) способствует достижению повышенной относительной плотности (97 %) и максимальной добротности материала. Установлено, что ключевой технологической проблемой при обжиге является интенсивное испарение оксида цинка (особенно в составах с высоким содержанием Ba^{2+}), приводящее к росту пористости, снижению плотности и формированию примесных фаз. Для минимизации потерь цинка обжиг проводили с использованием засыпки из оксида цинка и того же порошка. Установлено, что оптимальным вариантом является засыпка из порошка того же состава, которая позволяет повысить плотность до 97 % и избежать образования поверхностных включений, снижающих добротность. Полученные результаты демонстрируют эффективность комбинированного подхода (допирование и оптимизация условий обжига) для создания керамики с улучшенными диэлектрическими характеристиками.

Ключевые слова: диэлектрические резонаторы, микроволновая керамика, СВЧ-техника, твердые растворы, сложный перовскит

I. ВВЕДЕНИЕ

Неотъемлемой частью современной радиоэлектроники являются диэлектрические резонаторы (ДР), применяющиеся в частотных детекторах, фильтрах и осцилляторах, в спутниковых системах и системах вещания [1]. Внедрение ДР в производство радиоэлектронной техники позволило существенно улучшить не только массогабаритные характеристики изделий, но и их частотную селективность, так как собственные потери в диэлектриках малы [1, 2].

К ключевым свойствам материалов для ДР относятся относительная диэлектрическая проницаемость ε_r и добротность Q (или Q·f, где f – резонансная частота). Относительная диэлектрическая проницаемость обычно находится в диапазоне от 20 до 100. Добротность Q, являющаяся величиной, обратной тангенсу угла диэлектрических потерь tgδ при выбранной частоте, должна быть как можно выше для максимальной селективности сигналов [3]. Для керамики эта величина непостоянна и может уменьшаться с ростом частоты, что связано со статистически большим количеством дефектов кристаллической структуры в образце большего размера и диэлектрической релаксацией [4].

Исследования, связанные с микроволновыми диэлектриками, ведутся уже более полувека и позволили обнаружить множество материалов этой группы для новых областей применения и разработки новых технологий [5]. Однако до сих пор ведутся активные поиски высокодобротных материалов для С – диапазона (3,4 − 8 ГГц) [6]. С-диапазон активно используется в спутниковой связи, радарах, системах навигации и других беспроводных технологиях. С развитием 5G, интернет вещей и спутниковой связи спрос на стабильные и эффективные решения в этом диапазоне только растет. Одним из перспективных керамических материалов для С-диапазона является $Ba(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$, поскольку он обладает ε_r = 40 и Q·f свыше 50000 [7]. Однако такие значения добротности зачастую оказываются недостаточными для реализации фильтров с максимальной селективностью сигнала, особенно в условиях жёстких требований к полосе пропускания и подавлению соседних каналов. Для сложных перовскитов структуры типа $A(B'_{1/3}B''_{2/3})O_3$, которым является (BZN), имеющих упорядоченную структуру, изменение катионного состава на позиции А открывает возможности для тонкой настройки структурных и диэлектрических характеристик. Например, замещение Ba^{2+} на Sr^{2+} (твердые растворы $Ba_{1-x}Sr_x(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$) активно исследовалось в ряде работ [8, 9], поскольку ионы стронция имеют меньший ионный радиус, что влияет на параметры решётки и степень упорядоченности В-катионов. При этом эффект от замещения не является линейным: при определённых концентрациях Sr^{2+} наблюдается улучшение добротности, тогда как дальнейшее увеличение содержания стронция может приводить к росту потерь из-за нарушения упорядоченной структуры или появления дефектов. Поэтому актуальной задачей становится определение оптимальной концентрации Sr^{2+}, которая позволит

достичь максимального значения Q·f при сохранении стабильности диэлектрических свойств в С – диапазоне.

II. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Определены оптимальные параметры синтеза $Ba(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ (BZN) и $Sr(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ (SZN). Методом твердофазной реакции при 1100 °С в течение 2 ч синтезированы однофазные исходные компоненты для получения ряда твердых растворов на основе $Ba_{1-x}Sr_x(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$, где x = 0,00; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,50; 0,60; 0,70; 0,80; 0,90; 1,00. Полученные порошки измельчали в планетарной мельнице до среднего размера частиц менее 1 мкм. Затем проводили обжиг в воздушной среде без засыпки для BZN и SZN при 1300 °С − 1500 °С для твердых растворов при 1500 °С в течение 4 ч. Во избежание испарения цинка из системы так же проводили обжиг в воздушной среде в засыпке из оксида цинка в течение 1450 °С в течение 4 ч.

Исследование образцов проводилось методами рентгенофазого анализа и сканирующей электронной микроскопией. Рентгенограммы получали с помощью рентгеновского порошкового дифрактометра PowDIX 600 (ЗАО «ЛИНЕВ АДАНИ», Республика Беларусь). В качестве материала анода используется Cu с Ni-фильтром, анодное напряжение – 30 кВ, анодный ток – 10 мА. Съемку проводили в диапазоне 2θ: 5-80° со скоростью 3,5 °/мин с шагом 0,01°. Микроструктуру керамических образцов изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа Zem 15C (Zeptoops, Китай). Ускоряющее напряжение составляло 15 кВ, увеличение х500. Кажущуюся плотность керамики определяли методом Архимеда, относительную высчитывали отношением кажущейся плотности к истинной. За истинную плотность материалов принимали значения для $Ba(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ 6,5 г/см^3, для $Sr(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ 5,7 г/см^3, для твердых растворов высчитывали по правилу аддитивности исходя из плотностей и соотношения выбранных компонентов. Определение диэлектрических характеристик (Q и ε_r) проводили с помощью векторного анализатора электрических цепей E5071C на частотах 3,3 – 4,2 ГГц.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В диапазоне температур 900 − 1100 °С определены оптимальные условия синтеза компонентов (BZN и SZN) для получения керамических материалов на основе твердых растворов $Ba_{1-x}Sr_x(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$. Для полученных однофазных BZN и SZN рассчитаны параметры ячейки. Проведено исследование параметров обжига на фазовый состав и плотность компонентов. В отличие от SZN, в системе BZN количество примеси, связанной с испарением цинка, выше. Установлено, что скорость испарения оксида цинка в системе с барием выше, поскольку уже при 1450 ℃ наблюдается снижение плотности и увеличение открытой пористости. После обжига твердых растворов без использования засыпки обнаружены примесные фазы, в том числе Ba5(Nb4O15,33). Их наличие также связано с испарением цинка из системы. Получены зависимости относительной плотности и диэлектрических характеристик материалов от содержания Sr2+. Наибольшие значения добротности достигнуты у систем состава $Ba_{0,7}Sr_{0,3}(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$, $Ba_{0,65}Sr_{0,35}(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$, $Ba_{0,6}Sr_{0,4}(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$, что обусловлено высокой относительной плотностью. Установлено, что наиболее интенсивно процесс испарения цинка проходит в твердых растворах с большим содержанием Ba^{2+}, из-за чего у ряда образцов низкая относительная плотность, а, следовательно, и низкая добротность. Во избежание испарения цинка обжиг заготовок $Ba_{1-x}Sr_x(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ (x = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 1) проводили при 1450 ℃ в течение 4 ч в плотно закрытых корундовых тиглях с засыпкой из оксида цинка и из порошка того же состава. Изучено влияние засыпки на диэлектрические характеристики керамики. В отличие от образцов, обожженных без засыпки, в полученной серии твердых растворов с засыпкой из оксида цинка присутствует только примесь ZnO в количестве от 2 % до 3 % по массе. Помимо этого, относительная плотность образцов керамики составила 97 %. Полученные данные свидетельствуют о том, что использование засыпки из оксида цинка оказывает положительное влияние на характеристики твердых растворов. Однако сканирующая электронная микроскопия поверхности образцов, обожжённых с засыпкой из ZnO, выявила локальные включения, обогащённые цинком. Их образование связано с миграцией частиц засыпки на поверхность образца в процессе высокотемпературного обжига. Наличие этих включений приводит к локальным неоднородностям диэлектрических свойств и, как следствие, к снижению добротности материала. Использование засыпки из порошка того же состава исключает этот эффект, поскольку химический потенциал компонентов засыпки и образца идентичен, что подавляет диффузионный перенос.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования определены оптимальные условия синтеза твёрдых растворов $Ba_{1-x}Sr_x(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$. и показано, что ключевой проблемой при обжиге является испарение цинка, ведущее к росту пористости и образованию примесных фаз; частичное замещение Ba^{2+} на Sr^{2+} (в диапазоне x = 0,3–0,4) в сочетании с обжигом в закрытых тиглях с засыпкой из порошка того же состава

позволяет достичь высокой плотности (до 97 %) и максимальной добротности, что делает такие керамики перспективными для СВЧ-устройств С-диапазона.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение о предоставлении из федерального бюджета гранта в форме субсидий на осуществление государственной поддержки программ развития научных центров мирового уровня, выполняющих исследования и разработки по приоритетным направлениям научно-технологического развития № 075-15-2026-328 от 06.05.2026 г.).

ЛИТЕРАТУРА

[1] Mohanan P., Mridula S. Applications of Dielectric Resonators // Microwave Materials and Applications. – 2017. – P. 683-714. http://doi.org/10.1002/9781119208549

[2] Ильченко М.Е., Взятышев В.Ф., Гассанов Л.Г., Безбородов Ю.М., Бергер М.Н., Добромыслов В.С., Капилевич Б.Ю., Нарытник Т.Н., Федоров В.Б., Черний Б.С. Диэлектрические резонаторы //М.: Радио и связь, 1989. – 328 с.

[3] Freer R., Azough F. Microstructural engineering of microwave dielectric ceramics // Journal of the European Ceramic Society. – 2008. – Vol. 28. – No. 7. – P. 1433-1441. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.12.005.

[4] Li L., Chen X.M. Frequency-dependent Qf value of microwave dielectric ceramics //Journal of the American Ceramic Society. – 2014. – Vol. 97. – No. 10. – P. 3041-3043. https://doi.org/10.1111/jace.13199.

[5] Yang H. et al. The latest process and challenges of microwave dielectric ceramics based on pseudo phase diagrams //Journal of Advanced Ceramics. – 2021. – Vol. 10. – No. 5. – P. 885-932. https://doi.org/10.1007/s40145-021-0528-4.

[6] Wang X. et al. Ultralow-loss and temperature-stable microwave ceramics for C-band dielectric resonator antennas //Journal of the European Ceramic Society. – 2026. – Vol. 46. – P. 118605. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2026.118605

[7] Peng S., Zhang Y., Yi T. Research progress of Ba (Zn1/3Nb2/3) O3 microwave dielectric ceramics: a review //Materials. – 2023. – Vol. 16. – No. 1. – P. 423-430. http://doi.org/10.3390/ma16010423

[8] Shi F., Dong H. Correlation of crystal structure, dielectric properties and lattice vibration spectra of $(Ba_{1-x}Sr_x)(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ solid solutions // Dalton Transactions. – 2011. – Vol. 40. – No. 25. – P. 6659-6667. http://doi.org/10.1039/c0dt01507e.

[9] Nomura S., Toyama K., Kaneta K. Dielectric Properties of Ceramics in the $Ba(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$Sr(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ Solid Solutions // Japanese Journal of Applied Physics. – 1983. – Vol. 22. – No. S2. – P. 83. http://doi.org/10.7567/JJAPS.22S2.83/meta.

DEVELOPMENT OF A MICROWAVE CERAMIC MATERIAL FOR THE C-BAND

V.E. Bazarova, I.D. Akinshin, A.N. Khrustalev, L.A. Arbanas, E.D. Verkhova, A.A. Smirnova, E.K. Serova, A.B. Smirnov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation, BazarovaVE@yandex.ru

Abstract: the paper investigates solid solutions of $Ba_{1-x}Sr_x(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ as promising high‑Q ceramic materials for microwave devices operating in the C‑band. The optimal conditions for the synthesis of BZN and SZN components have been determined within the temperature range of 900 – 1100 °C, and the parameters of the unit cell have been calculated. Samples of solid‑solution ceramics have been prepared and studied. It has been shown that partial substitution of Ba^{2+} with Sr^{2+} (at x = 0.3–0.4) contributes to achieving an increased relative density (97 %) and maximum quality factor of the material. It has been established that the optimal option is to use a powder of the same composition as the filler, which allows increasing the density to 97 % and avoiding the formation of surface inclusions that reduce the quality factor. The results obtained demonstrate the effectiveness of the combined approach (doping and optimization of firing conditions) for creating ceramics with improved dielectric characteristics.

Keywords: dielectric resonators, microwave ceramics, microwave technology, solid solutions, complex perovskite

УДК 519.853:536.2:539.3

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛООТВОДЯЩЕГО КОРПУСА ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

Новокшенов А.Д.[1], Карчевская А.С.[1], Матвеева А.И.[1], Боровков А.И.[1], Щербаков С.С.[2,3], Подгайская Д.А.[3], Мендель А.В.[3]

[1]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, karchevskaya_as@spbstu.ru

[2]Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь

[3]Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация: исследован фланцевый корпус GaN-on-SiC-транзистора при импульсном нагреве 1 мс с периодом 10 мс. Нестационарная топологическая оптимизация объединяет конечно-элементный термомеханический расчет, сопряженные производные и ограничения на перегрев и напряжения. При лимитах 60 К и 60 МПа масса оптимизируемой области снизилась с 0,198 до 0,020 г/мм. Стационарный проект при проверке в импульсном режиме превысил ограничения на 26 % по перегреву и 11 % по напряжениям. Результат показывает необходимость учитывать временную структуру нагрева.

Ключевые слова: топологическая оптимизация; СВЧ-корпус; импульсный нагрев; термоупругость.

I. ВВЕДЕНИЕ

Фланец мощного GaN-прибора одновременно отводит тепло от кристалла и воспринимает механические нагрузки. Уменьшение его массы ограничено допустимым перегревом и прочностью тепловых и силовых путей. В задачах охлаждения электронных корпусов топологическая оптимизация позволяет перераспределять материал с учетом термомеханического отклика [1]; для радиочастотных усилителей она применяется и при проектировании теплоотводов [2].

При импульсном питании температура кристалла и напряжения в корпусе зависят от длительности импульса и паузы между импульсами. Подложка и паяный слой реагируют быстрее массивного фланца; поэтому одинаковая средняя мощность не задает одинаковые пиковые температуры и температурные градиенты. Проект, рассчитанный только по стационарной средней мощности, может нарушить ограничения при проверке в рабочем цикле. Для оценки такого риска требуется нестационарная тепловая модель, связанная с расчетом напряжений.

Плотностная топологическая оптимизация на основе SIMP задает распределение материала в расчетной области [3]. Термоупругие постановки учитывают воздействие температурного поля на напряженное состояние [4], в том числе при совместных ограничениях на напряжения и температуру [5]. Исследования переходного термомеханического отклика [6], нестационарных тепловых нагрузок при ограничении напряжений [7] и зависящих от времени воздействий [8] показывают необходимость учитывать историю нагрева. При этом многократное интегрирование по времени увеличивает стоимость оптимизации [9].

В настоящей работе минимизируется масса фланцевого корпуса GaN-on-SiC-транзистора при импульсном нагреве с одновременным контролем перегрева кристалла и напряжений во фланце. Для каждого распределения материала вычисляется квазипериодический термомеханический отклик; производные ограничений определяются сопряженным методом, а плотности обновляются методом скользящих асимптот [10]. Сопоставление с вариантом, рассчитанным по средней мощности, позволяет оценить влияние временной структуры нагрузки на допустимость конструкции.

II. РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ И ОПТИМИЗАЦИЯ

Использована двумерная модель половины продольного сечения фланцевого корпуса GaN-on-SiC-транзистора в условиях плоской деформации (рисунок 1). Кристалл размером 3,2 × 0,1 мм соединен слоем припоя AuSn толщиной 50 мкм с фланцем CuMo размером 17,4 × 1,5 мм. Из области оптимизации исключены пьедестал под кристаллом, крепежная площадка и контактная подошва. Масса сплошной оптимизируемой области равна 0,198 г/мм, всего фланца – 0,261 г/мм.

На кристалл действует тепловой поток 9,77 МВт/м², соответствующий мощности 25 Вт во время импульса. Базовый режим: импульс 1 мс, период 10 мс; контактная теплопроводимость подошвы с шасси составляет $5 \cdot 10^4$ Вт/(м²·К). Ограничения заданы по максимумам перегрева кристалла 60 К и напряжений Мизеса во фланце 60 МПа.

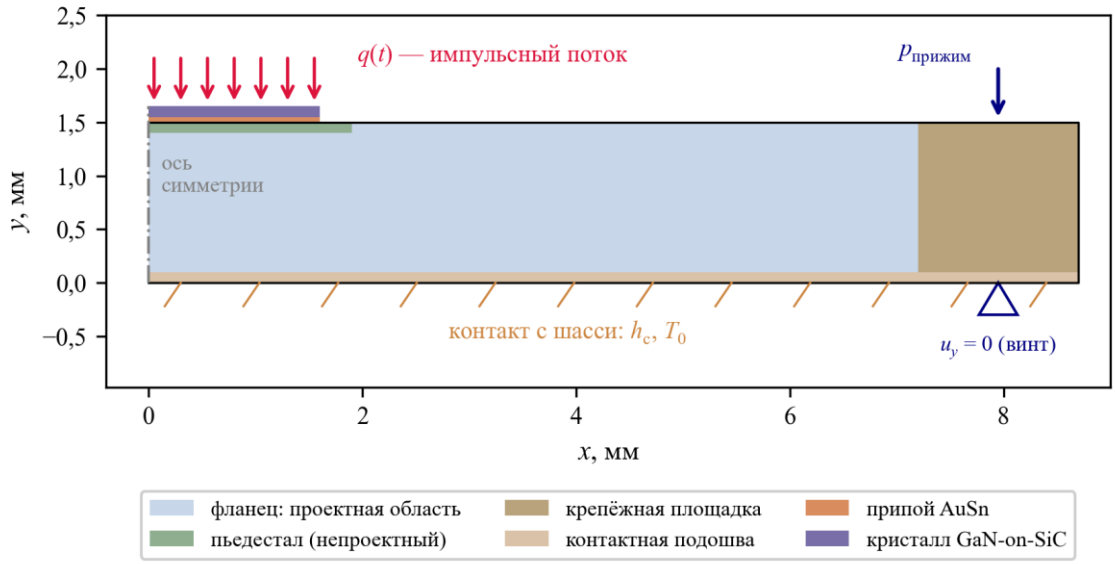


Рисунок 1. Расчетная схема корпуса, области материала, тепловые и механические граничные условия

Плотность материала интерполируется методом SIMP. Для каждого варианта вычисляется квазипериодическое температурное поле и квазистатический упругий отклик. Максимумы по расчетному циклу сглаживаются степенными нормами; дискретные сопряженные уравнения дают производные целевой функции и ограничений. Плотности обновляются методом скользящих асимптот. Стационарный расчет при средней мощности 2,5 Вт используется как контрольное сравнение.

Различие характерных времен объясняет необходимость переходной модели. Тепловая диффузия через подложку SiC толщиной 0,1 мм занимает около 0,06 мс, тогда как для фланца толщиной 1,5 мм характерное время достигает примерно 35 мс. Подложка успевает отреагировать в течение импульса 1 мс, но весь фланец не приходит к равновесию даже за период 10 мс. Поэтому одинаковая средняя мощность не задает одинаковые локальные пики температуры и напряжений.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ

Тепловой и упругий блоки проверены на аналитических задачах: ошибка интегральных характеристик не превысила 0,2 %, локального коэффициента концентрации – 0,7 %. Сопряженные производные согласовались с центральными конечными разностями с относительным расхождением менее 10^{-7}. Уточнение сетки и шага по времени изменило основные показатели оптимума на единицы процентов (рисунок 2).

При совместных ограничениях оптимизируемая область облегчена на 90 %: с 0,198 до 0,020 г/мм. Масса всего фланца снизилась с 0,261 до 0,083 г/мм. Материал сосредоточен в колоннах под кристаллом и подошве, обеспечивающих силовую и тепловую связность. При этом напряжения в припое и кристалле выросли; они не входили в заданные ограничения и требуют отдельного контроля.

Стационарная оптимизация дала более легкий вариант, но его нестационарная проверка показала перегрев 75,67 К и напряжения 66,66 МПа – превышение лимитов на 26 и 11 %. При одинаковой средней мощности изменение периода с 1 до 30 мс изменило оптимальную массу в 1,84 раза. Следовательно, средняя мощность не заменяет импульсную историю нагрузки.

Оптимальная структура использует сужающиеся колонны под кристаллом и контактную подошву: колонны образуют короткие силовые и теплопроводные пути, а подошва распределяет поток по контакту с шасси. Удаление материала между колоннами уменьшает массу, но усиливает локальную неоднородность жесткости. Поэтому температурное и прочностное ограничения оказываются одновременно активными. Контрольный расчет на уточненных сетках дал 57,85–60,08 МПа и 58,13–60,46 К, что показывает чувствительность результата к дискретизации вблизи заданных лимитов.

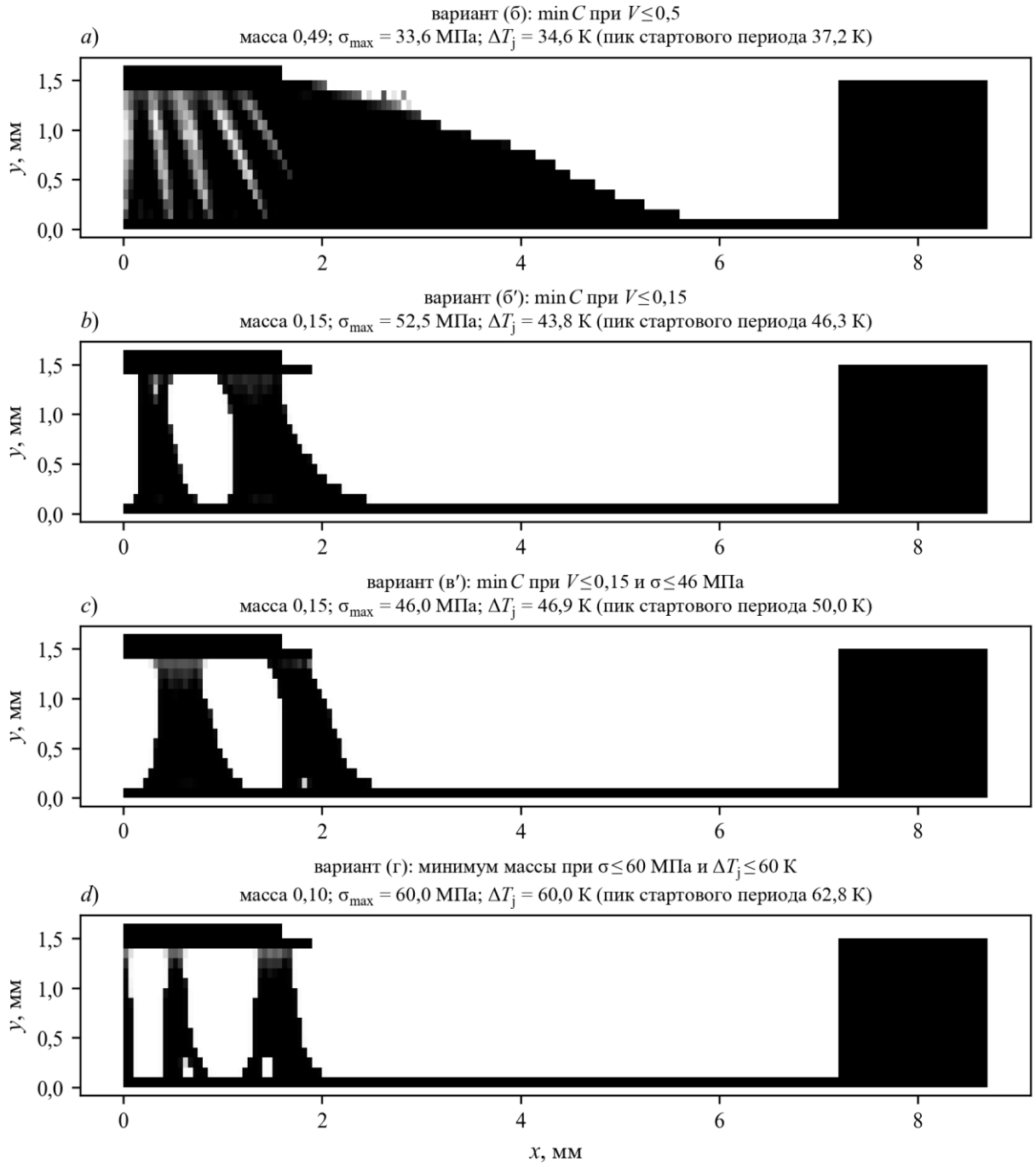


Рисунок 2. Распределение материала в вариантах оптимизации; нижний вариант учитывает совместные ограничения по напряжениям и перегреву

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нестационарная постановка позволила уменьшить массу фланца при совместном контроле перегрева и напряжений в самом фланце. Для перехода к рабочему изделию необходимы трехмерная проверка, учет напряжений в припое и кристалле, технологической предыстории пайки и температурной зависимости свойств.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при финансовой поддержке Санкт-Петербургского государственного автономного учреждения «Фонд поддержки научной, научно-технической, инновационной деятельности» в рамках договора № 25-РБ-09-16, а также при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор Т26СПбГ-004).

ЛИТЕРАТУРА

[1] Farzinazar S., Ren Z., Lim J., Kim J.C., Lee J. Thermomechanical topology optimization of three-dimensional heat guiding structures for electronics packaging // Journal of Electronic Packaging. 2022. Vol. 144, No. 2. Article 021118.

[2] Xiang H., Fu J., Shang Y., Inserra D., Guo R., Wen G. Fast heatsink topology optimization for RF power amplifier chip heat dissipation enhancement // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2025. Vol. 15, No. 9. P. 1953–1963.

[3] Bendsøe M.P., Sigmund O. Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications. Berlin: Springer, 2003. DOI: 10.1007/978-3-662-05086-6.

[4] Gao T., Zhang W. Topology optimization involving thermo-elastic stress loads // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2010. Vol. 42, No. 5. P. 725–738. DOI: 10.1007/s00158-010-0527-5.

[5] Meng Q., Xu B., Wang C., Zhao L. Thermo-elastic topology optimization with stress and temperature constraints // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2021. Vol. 122, No. 12. P. 2919–2944.

[6] Ogawa S., Yamada T. Topology optimization for transient thermomechanical coupling problems // Applied Mathematical Modelling. 2022. Vol. 109. P. 536–554.

[7] Li S., Zhang Y., Liu S., Wu S. Topology optimization of thermoelastic structures under transient thermal loads limited to stress constraints // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2023. Vol. 66, No. 1. Article 9.

[8] Guo Y., Cheng S., Wang Y., Lai X., Chen L. Topology optimization for transient thermoelastic structures under time-dependent loads // Engineering Computations. 2024. Vol. 40, No. 3. P. 1677–1693.

[9] Theulings M.J.B., Maas R., Noël L., van Keulen F., Langelaar M. Reducing time and memory requirements in topology optimization of transient problems // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2024. Vol. 125, No. 14. Article e7461.

[10] Svanberg K. The method of moving asymptotes – a new method for structural optimization // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 1987. Vol. 24, No. 2. P. 359–373. DOI: 10.1002/nme.1620240207.

TOPOLOGY OPTIMIZATION OF A HEAT DISSIPATING MICROWAVE PACKAGE UNDER PULSED THERMOMECHANICAL LOADS

A. Novokshenov[1], A. Karchevskaia[1], A. Borovkov[1], A. Matveeva[1], S. Sherbakov[2,3], D. Podgayskaya[3], A. Mendel[3]

[1]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia, novoksh_ad@spbstu.ru

[2]National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

[3]Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract: a flanged GaN-on-SiC transistor package is optimized under 1 ms heat pulses with a 10 ms period. Transient finite element analysis, discrete adjoint sensitivities, and stress and die-overheat constraints are combined with topology optimization. At limits of 60 MPa and 60 K, the optimization-domain mass decreased from 0.198 to 0.020 g/mm. A design optimized for average steady power exceeded the pulsed limits by 26% in overheat and 11% in stress. The results show that pulse timing must be represented explicitly in package design.

Keywords: topology optimization; microwave package; pulsed heating; thermoelasticity.

УДК 537.311.33

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗ ПЕРВЫХ ПРИНЦИПОВ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ АЛМАЗ <111>/ ВЕРТИКАЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ГРАФЕН

Мищенко В.Н., Лабунов В.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, mishchenko@bsuir.by

Аннотация: интеграция графена с алмазом, широкозонным полупроводником с высокой теплопроводностью, механической прочностью и устойчивостью к внешним воздействиям, создает условия для формирования структур, представляющих собой многофункциональную платформу для реализации новых фотонных и электронных устройств. В работе выполнено моделирование на основе первых принципов с использованием программного пакета Quantum Espresso гетероструктуры, которая была сформирована соединением алмаза с кристаллографической поверхностью (КП) <111> и «aimchair» вертикально ориентированного графена (ВОГ). Для такой гетероструктуры были исследованы структурные особенности расположения атомов углерода, входящих в состав алмаза и ВОГ, и выполнено моделирование зависимостей изменения плотности заряда и общего потенциала от величины энергии.

Ключевые слова: алмаз, графен, полупроводник, моделирование.

I. ВВЕДЕНИЕ

Соединение алмаза и вертикально ориентированного к нему графена (ВОГ) в настоящее время рассматривается как одно из наиболее перспективных направлений в разработке и создании полупроводниковых структур из углерода. При интеграции графена с алмазом, который относится к категории широкозонных полупроводников, и обладает исключительной теплопроводностью и механической прочностью, создаются условия для формирования гетероструктурных приборов, представляющих многофункциональную платформу для реализации новых оптических и электронных устройств [1-3]. Алмаз и графен, являясь аллотропами углерода, обладают схожими параметрами решетки, за счет чего существенно минимизируются межфазные дефекты, гарантируется механическая стабильность гетероперехода, формируются условия для эффективного переноса носителей заряда. Для создания подобных структур широкое применение нашла технология CVD (chemical vapor deposition – метод химического осаждения из газовой фазы). Эта технология в настоящее время хорошо отработана и обеспечивает в условиях высокой температуры рост на диэлектрических или алмазных поверхностях различных систем графеновых и графитовых слоев, имеющих толщину в несколько единиц или десятков нанометров [4-5].

Эпитаксиальный рост графена на алмазе рассматривался в [6] и [7] с использованием традиционной технологии CVD. При этом делался вывод, что ВОГ формировался на кристаллографической плоскости (КП) <111> алмаза на основе регистровых соотношений 1:1 и 2:1 (или соотношения количества элементарных ячеек (или групп атомов) алмаза и графена), соответственно. В [8] была синтезирована гибридная структура, в которой наноструктуры графена образуются на полированных текстурированных алмазных КП <111> с использованием высокотемпературной (~1300 С) обработки при CVD с плазмой постоянного тока и демонстрируется возможность изменения ширины запрещенной зоны вертикальной гибридной структуры вида алмаз/(ВОГ+водород). В [2] теоретически использована модель формирования структур алмаз/(ВОГ+водород) для регистрового соотношения 5:3, для которого рассматривалось сочетание пяти атомарных ячеек алмаза при присоединении к ним трех ячеек графена, при этом в двух оставшихся ячейках алмаза к нему присоединялись по одному атому водорода. Моделирование, выполненное в [2], показало, что формируемые при этом структуры вида алмаз/(ВОГ+водород) обладают шириной запрещенной зоны в диапазоне значений 0,25 - 1,85 эВ. При этом было установлено, что ширина запрещенной зоны уменьшается при увеличении толщины (высоты) слоев графена вплоть до величины 1,4 нм.

II. ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЙ АЛМАЗА И ВЕРТИКАЛЬНОГО ГРАФЕНА

Моделирование из первых принципов соединений вида алмаз/ВОГ выполнялось в рамках теории функционала плотности DFT (Density Functional Theory), реализованной в программном комплексе Quantum Espresso [9]. Было использованы обобщенное градиентное приближение GGA **(**Generalized Gradient Approximation**),** функционал обмена-корреляции PBE **(**Perdew-Burke-Ernzerhof) [10]. Были выбраны псевдопотенциалы типа PAW *(*Projector Augmented Wave) для представления взаимодействия между ядрами и валентными электронами, и дисперсионная поправка вида vdw_corr = 'dft-d3' для

корректного описания интерфейса алмаза с КП <111> и ВОГ. Волновые функции Кона-Шэма были представлены базисом плоских волн с энергетическим порогом 50 Ry (1 Ry ≈ 10,35 эВ) для волновых функций и с порогом 400 Ry для электронной плотности. Интегрирование по зоне Бриллюэна для плотности заряда и полной энергии выполнялось с использованием сетки k-точек [11] по схеме Мефесселя-Пакстона с параметром сглаживания равным 0,01 Ry [12].

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУКТУРНЫХ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОЕДИНЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ГРАФЕНА И АЛМАЗА С КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ПЛОСКОСТЬЮ <111>

При моделировании свойств алмаза рассматривалась его кубическая аллотропная модификация, при которой атомы углерода формируют тетраэдрическую решетку с sp^3-гибридизацией [13]. Для анализа ВОГ важной особенностью является расположения атомов углерода на краю структуры. Эту особенность учитывают структуры, которые получили название “кресло” (“armchair”), “зигзаг” (“zigzag”) и ряд других [14]. В дальнейшем ограничимся анализом структурных и электрофизических особенностей формирования соединений для ВОГ вида “кресло” (“armchair”) и алмаза с КП <111>.

Были исследованы структурные особенности расположения атомов углерода, входящих в состав алмаза, в конфигурации структурной ячейки размером 2x1x1, где последовательность цифр соответствует направлению координат x, y и z, соответственно. При разработке модели структурной группы атомов углерода для алмаза с КП <111> за основу была взята модель Pandey, предложенная для структурной ячейки размером 2x1x1 [15]. Для исследования ВОГ была разработана модельная группа из 10 атомов углерода, объединенных в два шестиугольных (гексогональных) кольца, имеющих общую границу и располагающихся в одной плоскости.

Поиск возможных вариантов расположения атомов ВОГ относительно алмаза с его КП <111> выполнялся с использованием операции релаксации relax по алгоритму bfgs в программном комплексе моделирования Quantum Espresso. В результате выполнения операции релаксации была получена комплексная структурная группа атомов углерода, сформированная из групп атомов алмаза и ВОГ, и представленная на рис. 1-2. Анализ рис. 1-2 показывает, что происходит формирование ковалентных связей между атомами g1-a2 и g2-a25, где атомы g1 и g2 принадлежат графену, а атомы a2 и a25 входят в состав алмаза.

Для анализа электрофизических особенностей соединения ВОГ и алмаза с КП <111> было выполнено моделирование зависимостей изменения плотности заряда Δn(r) и суммарного потенциала U(r) от величины энергии. Параметр Δn(r) имеет размерность e/(Bohr)^3, где e – заряд электрона, параметр Bohr ≈ 5.291×10^{-11} м, а параметр U(r) - размерность в Ry.

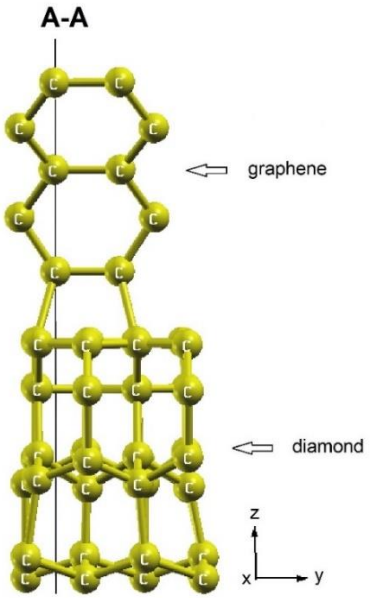


Рисунок 1. Расположение атомов ВОГ и алмаза в ячейке размером 2x1x1 после релаксации

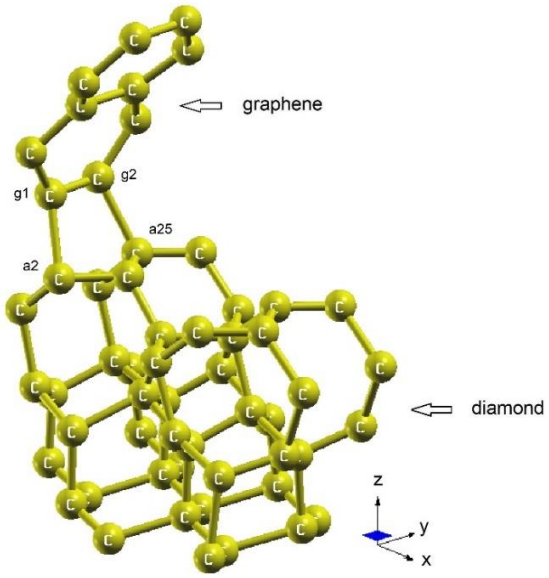


Рисунок 2. Расположение атомов ВОГ и алмаза в ячейке размером 2x1x1 после релаксации

Результаты моделирования зависимостей изменения плотности заряда Δn(r) и общего потенциала U(r) от величины энергии, которые формируются в плоскости A-A (рис. 1) для структурной группы после релаксации, представлены на рис. 3-4, соответственно.

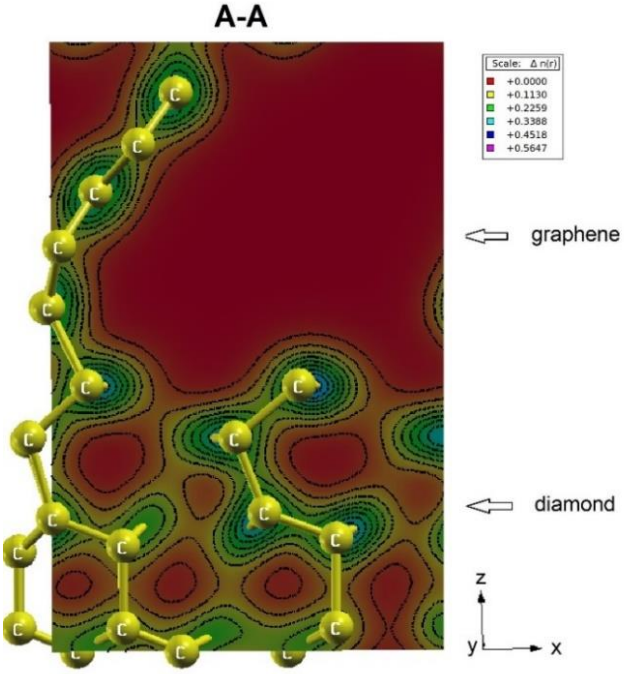


Рисунок 3. Распределение изменения плотности заряд Δn(r) в плоскости A-A

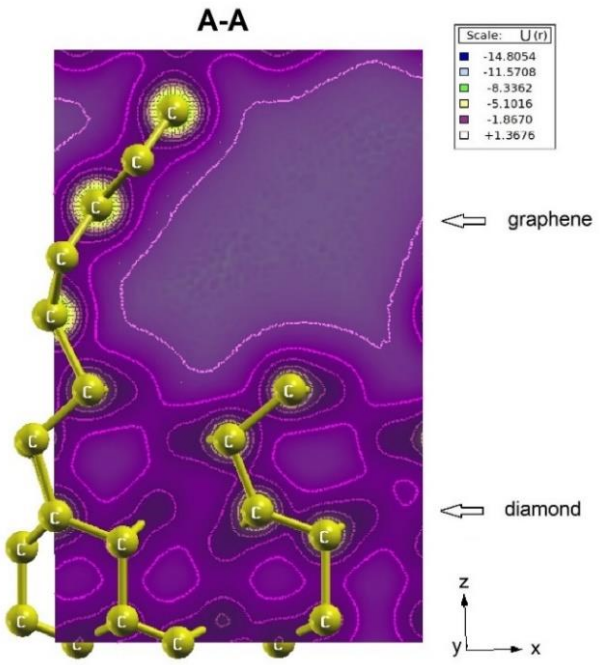


Рисунок 4. Распределение общего потенциала U(r) в плоскости A-A

Анализ рис. 3-4 показывает, что полученная после релаксации комплексная структурная группа, состоящая из атомов углерода ВОГ и алмаза, имеет в своей структуре протяженные высокоэнергетические зоны, связанные с увеличенными значениями заряда и потенциала.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены структурные и электрофизические свойства гетероструктурного соединения ВОГ вида “кресло” (“armchair”) и алмаза с КП <111>, формирование которого возможно при использовании технологии CVD. Результаты моделирования из первых принципов, полученные с использованием программного комплекса Quantum Espresso, позволили исследовать структурные особенности соединения атомов ВОГ и алмаза. При моделировании была использована модель структурной группы атомов углерода для алмаза с КП <111>, построенная на основе модели Pandey, а ВОГ был представлен модельной группой из 10 атомов углерода, которые объединены в два смежных шестиугольных кольца. Создание гибридных систем вида алмаз/ВОГ позволяет повысить эффективность работы разрабатываемых фотоэлектронных устройств. Этому способствует наличие ряда специфических особенностей, связанных с созданием условий накопления высокой концентрации носителей заряда в областях алмаза и ВОГ, формирующих их границу раздела. Таким образом, можно утверждать, что распределение электрического поля в областях алмаза и ВОГ, которое формирует их границу раздела, будет способствовать повышению эффективности работы разрабатываемых фотоэлектронных устройств. Полученные результаты моделирования показывают, что разработка углеродных гибридов, представляющих соединения алмаза с одной стороны и ВОГ с другой стороны, позволяет прогнозировать создание новых фотоэлектронных устройств, которые способны конкурировать с традиционными кремниевыми технологиями, особенно в условиях экстремальных температур и радиации.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Microstructure engineering in diamond-based materials / A. Nie, Z. Zhao, B. Xu, Y. Tian // Nat. Mater. 2025. Vol. 24, No 8. P. 1172–85.
[2] The surface hybridization of diamond with vertical graphene: a new route to diamond electronics / KPSS Hembram, S. Lee, H. Im, H. Ju, S-H. Jeong, J-K. Lee // Mater. Horiz. 2020. Vol. 7, No 2. P. 470–476.

[3] Mixed sp2-sp3 nanocarbon materials: a status quo review / J. Vejpravova // Nanomaterials. 2021. Vol. 11, No 10. P. 2469.
[4] High-efficiency photoelectric conversion in graphene–diamond hybrid structures: model and first-principles calculations / S. Konabe, NT. Cuong, M. Otani, S. Okada // Appl. Phys. Express. 2013. Vol. 6, No 4. P. 045104.

[5] Diamond-graphene composite nanostructures / P. Németh, K. McColl [et al.] // NanoLett. 2020. Vol. 20, No 5. P. 3611–3619.

[6] Interface engineering of a silicon/graphene heterojunction photodetector via a diamond-like carbon interlayer / J. Yang, L. Tang [et al.] // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2021. Vol. 13, No. 3. P. 4692–702.

[7] Ultrahigh mechanical robustness of vertical graphene sheets covalently bonded to diamond / S. Chen, Q. Lin, Z. Ji, Z. Sun, B. Shen // Carbon. 2023. Vol. 201. P. 390–8.

[8] The synthesis of graphene nanowalls on a diamond film on a silicon substrate by direct-current plasma chemical vapor deposition / Y. Tzeng, WL. Chen, C. Wu, J. Lo, C. Li // Carbon. 2013. Vol. 53. P. 120–9.

[9] QUANTUM ESPRESSO: a modular and open-source software project for quantum simulations of materials / P. Giannozzi, S. Baroni., N. Bonini, M. Calandra [et al.] // J. Phys.: Condens. Matter. 2009. Vol. 21. P. 395502.

[10] Generalized Gradient Approximation Made Simple / J. P. Perdew, K. Burke and M. Ernzerhof // Phys. Rev. Lett. 1996. Vol. 77. P. 3865.

[11] Special points for Brillouin-zone integrations / H. J. Monkhorst, J. D. Pack // Phys. Rev. B: Condens. Matter Mater. Phys. 1976. Vol. 13. P. 5188.

[12] High-precision sampling for Brillouin-zone integration in metals / M. Methfessel, A. T. Paxton // Phys. Rev. B: Condens. Matter Mater. Phys. 1989. Vol. 40. P. 3616.

[13] Study of the structural phase transition in diamond (100) & (111) surfaces / H. Gomez, M.N. Groves, M.R. Neupane // Carbon Trends. 2021. Vol. 3. P. 100033.

[14] Novel graphene-based nanostructures: physicochemical properties and applications / L. A. Chernozatonskii, P. B. Sorokin, A. A. Artukh Russ // Chem. Rev. 2014. Vol. 83, No 3. P. 251 – 279.

[15] New dimerized-chain model for the reconstruction of the diamond (111)-(2×1) surface / K. C. Pandey // Phys. Rev. 1982. Vol. B 25, P. 4338.

FIRST-PRINCIPLES MODELING OF A DIAMOND <111>/VERTICALLY ORIENTED GRAPHENE HETEROSTRUCTURE

V.N. Mishchanka, V.A. Labunov

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
mishchenko@bsuir.by

Abstract: integrating graphene with diamond – a wide-bandgap semiconductor characterized by high thermal conductivity, mechanical strength, and resistance to external factors - creates the conditions for forming structures that serve as a multifunctional platform for new photonic and electronic devices. In this study, first-principles modeling was performed using the Quantum Espresso software package to analyze a heterostructure formed by joining diamond at the <111> crystallographic surface with "armchair" vertically oriented graphene. The structural arrangement of carbon atoms within the diamond and graphene components was examined, and the energy dependence of charge density and total potential was modeled.

Keywords: diamond, graphene, semiconductor, modeling.

УДК 004.312

СРАВНЕНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ, ФОРМИРУЕМЫХ ПРИ ПОСТОБРАБОТКЕ СХЕМАМИ НА БАЗЕ МНОГОКАНАЛЬНОГО СИГНАТУРНОГО АНАЛИЗАТОРА И SHA-1

Петровский Д.А., Иванюк А.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, petrovky.dmitr@gmail.com

Аннотация: проведено сравнение характеристик последовательностей случайных чисел, прошедших постобработку схемами на базе модифицированного многоканального сигнатурного анализатора и криптографической хеш-функцией SHA-1. Показано, что модифицированная схема обеспечивает более высокую энтропию по Шеннону и успешно проходит тесты NIST 800-22 при разрядности 48–512 бит, не уступая SHA-1 по доле пройденных тестов. При этом она требует на 15% меньше LUT-блоков, в 3 раза меньше триггеров и обладает в 5 раз большей расчетной тактовой частотой при реализации на программируемой логической интегральной схеме xc7z010-1clg400c-1. Результаты подтверждают перспективность схемы для энергоэффективных генераторов истинно случайных чисел в устройствах интернета вещей.

Ключевые слова: случайные данные, постобработка случайных чисел, многоканальный сигнатурный анализатор.

I. ВВЕДЕНИЕ

Генераторы истинно случайных чисел (TRNG, от англ. True Random Number Generator) являются фундаментальным компонентом современных криптографических систем, протоколов безопасного обмена ключами и IoT-устройств. Проектирование TRNG регламентируется, в частности, рекомендациями National Institute of Standards and Technology (NIST), которые определяют его структуру как комбинацию источников энтропии (ES), блока тестирования (Testing Unit) для каждого независимого однобитного ES и схемы постобработки (Post-Processing Unit). Обобщённая структура TRNG показана на рисунке 1.

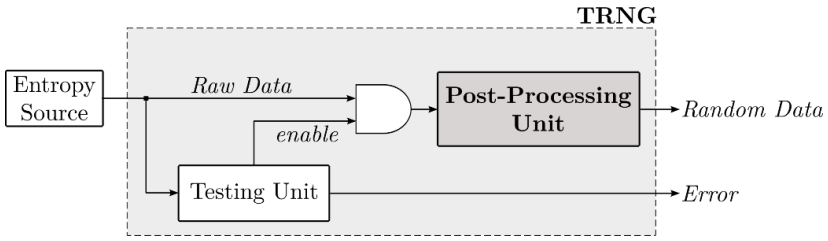


Рисунок 1. Обобщенная структура одноканального TRNG

Ядром TRNG является ES, физические процессы которого часто обладают смещённым распределением или остаточной предсказуемостью. Традиционно в качестве схем постобработки используются алгоритмические корректирующие схемы (корректор Фон Неймана, XOR-корректор, LFSR-структуры) и криптографические примитивы (хеш-функции, блочные шифры) [1]. Последние, в частности SHA-1, обеспечивают высокую энтропию и успешное прохождение тестов NIST 800-22, однако их аппаратная сложность, значительные затраты на кристалле и высокое энергопотребление делают их непригодными для мобильных и IoT-устройств. Базовые LFSR-архитектуры (SISA, от англ. Single-Input Signature Analyzer, MISA, от англ. Multi-Input Signature Analyzer) отличаются компактностью, но уступают в статистическом качестве при обработке последовательностей с низкой энтропией.

Актуальной задачей является проектирование схемы постобработки, сочетающей криптографическое качество с минимальными аппаратными затратами. В работе рассматривается модифицированная архитектура MISA с коэффициентом временного сжатия и механизмом пространственного эквивалента временной пересинхронизации. Будем называть такую схему MISA*. Цель исследования – сравнительный анализ MISA* с эталонной реализацией на базе SHA-1 по энтропии Шеннона и результатам тестов NIST 800-22.

II. ОПИСАНИЕ СХЕМЫ ПОСТОБРАБОТКИ

Базовая MISA [2] – многовходовой регистр сдвига с линейной обратной связью (LFSR, от англ. Linear Feedback Shift Register) для параллельной обработки g независимых однобитных потоков с

формированием n-разрядного слова за такт. Классические конфигурации требуют выполнения условия $g = n$, что предполагает эквивалентное число ES и блоков тестирования. В архитектуре MISA* намеренно введено условие $g < n$, что снижает аппаратные затраты и упрощает топологию подключения ES. Однако при $g < n$ возникает побочный эффект: при последовательном сжатии старшие разряды выходного слова заполняются младшими разрядами предыдущего такта, что дублирует символы и снижает энтропию. Для устранения дублирования применяется пересинхронизация: тактовая частота MISA в j раз выше частоты обновления данных от ES. Параметр j – коэффициент сжатия во времени: за период одного входного символа схема выполняет j тактов, многократно применяя матрицу связи и обратной связи к одному значению, что устраняет линейные корреляции. При аппаратной реализации непрерывная пересинхронизация избыточна. Работа схемы формализуется матричным рекуррентным уравнением состояния LFSR. Замена временных итераций пространственным преобразованием переводит модель в схему, выполняющую эквивалентные вычисления за один такт, за счёт роста числа итераций с g до $j \cdot g$ и циклического обращения к входным каналам (по модулю g). Это исключает дополнительные регистры синхронизации и буферы задержки, а вычислительная модель сводится к комбинационной логике. Поведение модифицированной схемы описывается выражением:

$$\mathbf{D}(k+1) = \mathbf{C}^{j \cdot g} \cdot \mathbf{D}(k) \oplus \left[\sum_{i=1}^{g \cdot j} \left(\mathbf{C}^{j \cdot g} \cdot \mathbf{X}_{i \bmod g}(k) \right) \right],$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & a_2 & \cdots & a_n \\ \hline & & & \\ \multicolumn{4}{c}{\mathbf{I}_{n-1}} & \begin{matrix}0\\ \vdots \\ 0\end{matrix} \end{bmatrix}; \mathbf{D}(k) = \begin{bmatrix} d_1(k) \\ d_2(k) \\ \vdots \\ d_n(k) \end{bmatrix}; \mathbf{X}_i(k) = \begin{bmatrix} x_i(k) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $\mathbf{C}$ – матрица сдвига и обратной связи LFSR, включающая коэффициенты характеристического полинома α_i (где $i = \overline{1,n}$); $\mathbf{D}(k)$ – n-разрядное двоичное слово, являющееся состоянием MISA* в k-й момент времени; x_i – значение символа на входе MISA* в k-й момент времени, которое можно представить в виде вектора $\mathbf{X}_i(k)$.

MISA* и SHA-1 различаются типом преобразований. Постобработка SHA-1 основана на нелинейных криптографических операциях (циклические сдвиги, сложение по модулю, логические функции) и каскадной или конвейерной структуре: это даёт высокую стойкость, но требует значительных аппаратных затрат. MISA* использует только линейные операции над фиксированным примитивным неприводимым полиномом, что обеспечивает архитектурную простоту и высокую тактовую частоту, но требует строгого контроля параметров g, n и j для достаточной энтропии. Далее в работе количественно оценивается, как выбранное соотношение параметров MISA* позволяет достичь статистического качества, сопоставимого с нелинейным хешированием SHA-1.

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В экспериментальной части было проведено сравнение двух подходов к постобработке случайных последовательностей: на основе MISA* и с использованием криптографической хэш-функции SHA - 1 [3]. Эффективность оценивалась по энтропии Шеннона и набору статистических тестов NIST 800-22. Исходными (необработанными) данными служили три набора: CIFAR-10 (цветные RGB-изображения, преобразованные в битовый поток; исходная энтропия 0,9889), Arbiter PUF (данные схемотехнической реализации ФНФ типа арбитр; исходная энтропия 0,9454) и BAD (программно сгенерированные данные; исходная энтропия 0,2476)

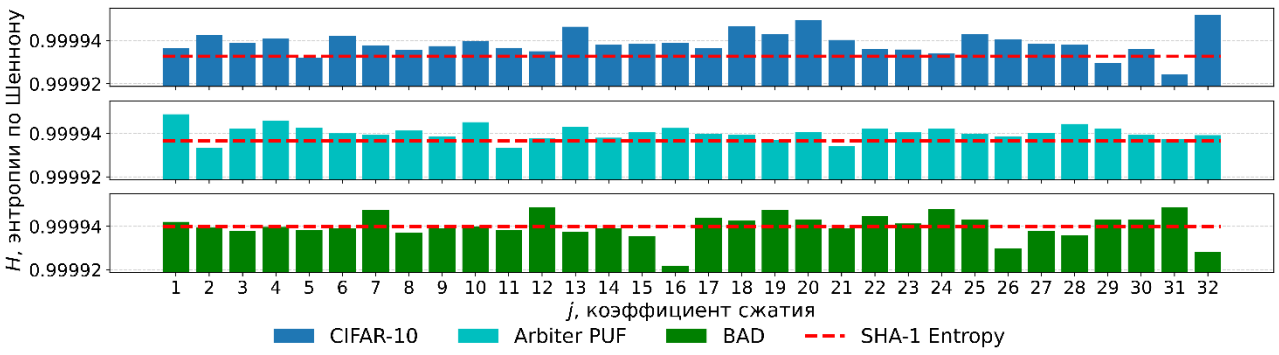


Рисунок 2. Энтропия обработанных последовательностей схемой на базе MISA* с различным j

На первом этапе сравнивались значения энтропии Шеннона для схемы MISA* и SHA-1 при идентичных параметрах: произвольное начальное состояние, число входных каналов $g = 32$, разрядность схемы $n = 512$ и разрядность обрабатываемого слова 32. Для схемы MISA* применялся порождающий полином $\varphi(x) = x^{512} + x^{510} + x^{507} + x^{504} + 1$ с коэффициентом сжатия $j = \overline{1{,}32}$.

Как следует из рисунка 2, на наборах данных с высокой энтропией CIFAR-10 и Arbiter PUF, схема на базе MISA*, при сопоставимых со схемой SHA-1 параметрах, обеспечивает более высокое численное значение энтропии обработанных последовательностей независимо от коэффициента сжатия. На наборе с искусственно низкой энтропией BAD, схема на базе MISA* показала сравнимый результат с SHA-1.

В завершение было проведено сопоставление результатов набора статистических тестов NIST 800–22 для данных, обработанных программными моделями схем MISA* с различной разрядностью, а также схемой SHA-1. Тестированию подвергались обработанные последовательности длиной $8x10^7$ бит, разбитые на 80 подпоследовательностей по 10^6 бит каждая. Данные были получены с помощью программного стенда для экспериментов с набором CIFAR-10. Итоги статистических тестов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты NIST тестирования последовательностей, обработанных схемами на базе SHA-1 и MISA* с различной разрядностью

Название теста	P-value						
	Исходные данные	MISA*					SHA-1
		48	64	128	256	512	
Frequency	н/п	0,1056	0,4372	**0,5091***	0,4145	0,2133	0,0449
BlockFrequency	н/п	0,6890	0,8119	0,1742	0,3306	0,2932	**0,8555***
CummulativeSums	н/п	0,3115	0,7399	0,3924	0,5341	0,1315	**0,8755***
Runs	н/п	0,6371	0,2429	0,6371	0,7146	**0,7887***	0,4145
LongestRun	н/п	0,1056	0,4606	0,7646	0,7399	**0,9535***	0,0032
Rank	н/п	0,7146	0,6890	**0,8555***	0,3924	0,6371	0,4846
FFT	н/п	0,0043	0,1137	0,1223	0,7146	**0,7887***	0,4372
NonOverlapingTemplate	н/п	0,7146	0,9535	0,8755	0,8555	**0,9733***	0,8555
OverlapingTemplate	н/п	0,6371	**0,7646***	0,3504	0,2429	0,3924	0,4606
Universal	н/п	**0,8555***	0,0274	0,4846	0,1626	0,6890	0,8119
ApproximateEntropy	н/п	0,5091	**0,9411***	0,6111	0,5852	0,7887	0,5595
RandomExcursions	н/п	0,1742	**0,8513***	0,4372	0,8343	0,3041	0,8343
RandomExcursionsVariant	н/п	0,3306	0,8165	0,5852	0,1056	0,4372	**0,8343***
Serial	н/п	**0,9914***	0,8119	0,4846	**0,9914***	0,9270	0,9270
LinearComplexity	0,000012	0,6631	0,6111	0,3115	**0,9114***	0,0138	0,2932
Обозначение – н/п – тест не пройден							
Обозначение – ***** – наибольшее значение P-value в строке							

Как следует из таблицы 1, все схемы постобработки обеспечили улучшение статистических характеристик выходных последовательностей относительно исходных данных набора CIFAR-10. По доле успешно пройденных тестов для обработанных последовательностей схемы MISA* не уступают схеме SHA-1. Для всех рассмотренных разрядностей MISA* тестирование завершилось успешно, что свидетельствует о равномерности распределения формируемой последовательности, а также об отсутствии в ней предсказуемых шаблонов и автокорреляций.

В процессе исследований оценивались аппаратные затраты схем постобработки на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) (табл. 2). Для схемs MISA* было разработано параметризуемое описание на HDL-языке SystemVerilog. Сравнение не включало сопутствующие аппаратные затраты на блоки тестирования.

Таблица 2. Оценка аппаратных затрат схем TRNG для кристалла ПЛИС xc7z010-1clg400c-1

Тип постобработки	Аппаратные затраты		Максимальная частота
	LUT-блоков	Триггеров	МГц
MISA*	1352	512	502
SHA-1	1553	1531	108

Анализ данных табл. 2 показывает, что схема MISA* требует меньше аппаратных затрат ПЛИС по сравнению с SHA-1, LUT-блоков меньше на 15%, триггеров меньше в три раза и расчетная максимальная тактовая частота в пять раз выше. Предполагается, что данная схема при равной тактовой частоте будет обладать наименьшим энергопотреблением из-за меньшего использования аппаратных ресурсов. Это делает ее подходящей для применений, требующих энергоэффективности и компактности, таких как простые схемы TRNG в устройствах интернета вещей.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено сравнение последовательности случайных чисел после двух схем постобработки: MISA* и эталона на SHA-1. Эксперимент показал, что при равных параметрах MISA* даёт более высокую энтропию по Шеннону чем SHA-1. Тесты NIST 800-22 показали сопоставимое качество обеих схем: все конфигурации MISA* (48–512 бит) прошли испытания, тогда как исходные данные не прошли ни одного. Ранее выявленное ограничение — провал теста Rank [4] при разрядности менее 32 бит — устранено увеличением разрядности. Оценка аппаратных затрат для ПЛИС: MISA* требует на 15 % меньше LUT - блоков, втрое меньше триггеров и даёт в пять раз более высокую расчётную тактовую частоту по сравнению с SHA-1. Это делает её перспективной для энергоэффективных TRNG, включая устройства интернета вещей.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают искреннюю благодарность резиденту ПВТ компании «Инженерный Центр Ядро», которая является одним из центров разработки YADRO, за предоставленное оборудование для проведения экспериментов в рамках работы совместной учебной лаборатории с Белорусским государственным университетом информатики и радиоэлектроники.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Fischer, V. True Random Number Generators in FPGAs / V. Fischer // Security Trends for FPGAs: From Secured to Secure Reconfigurability / B. Badrignans, J.-L. Danger, V. Fischer [et al.]. – Dordrecht : Springer Netherlands, 2011. – P. 101–135. – DOI: 10.1007/978-94-007-1338-3_5.

[2] Ярмолик, В. Н. Построение многоканальных сигнатурных анализаторов / В. Н. Ярмолик // Автоматика и телемеханика. – 1985. – № 1. – С. 127–132

[3] Jun, B. The Intel Random Number Generator / B. Jun, P. Kocher // Cryptograph Research Inc., White Paper. – 1999. – Vol. 27. – P. 1–8

[4] Петровский, Д. А. Анализ характеристик схемы постобработки последовательности случайных чисел на основе многоканального сигнатурного анализатора / Д. А. Петровский, А. А. Иванюк // Информационные технологии и системы 2024 (ИТС 2024) = Information Technologies and Systems 2024 (ITS 2024) : материалы международной научной конференции, Минск, 20 ноября 2024 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол. : Л. Ю. Шилин [и др.]. – Минск, 2024. – С. 93–94.

COMPARISON OF RANDOM NUMBER SEQUENCES GENERATED VIA POST-PROCESSING USING MULTI-CHANNEL SIGNATURE ANALYZER AND SHA-1 BASED SCHEMES

D. Petrovsky, A. Ivaniuk

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
petrovky.dmitr@gmail.com

Abstract: a comparison was conducted between the characteristics of random number sequences subjected to post-processing using schemes based on a modified multi-channel signature analyzer and the SHA-1 cryptographic hash function. It is shown that the modified scheme yields higher Shannon entropy and successfully passes NIST 800-22 tests for bit widths ranging from 48 to 512 bits, matching SHA-1 in terms of the proportion of tests passed. Furthermore, when implemented on the xc7z010-1clg400c-1 FPGA, the scheme requires 15% fewer LUTs and three times fewer flip-flops, while achieving a five times higher estimated clock frequency. These results demonstrate the scheme's potential for use in energy-efficient true random number generators within Internet of Things (IoT) devices.

Keywords: random data, random number post-processing, multi-input signature analyzer.

УДК 621.3.049.77

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОСЛОЙНОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МИКРОАКТУАТОРА ПО ЗАДАННЫМ ЧАСТОТАМ

Авдонюшкин Д.В., Новокшенов А.Д.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия,
avdonyushkin.dmitrij@mail.ru

Аннотация: рассмотрена задача топологической оптимизации многослойного пьезоэлектрического микроактуатора. Проектными переменными служат поля плотности несущего и пьезоэлектрического слоёв фиксированной толщины. Целевая функция минимизирует отклонения собственных частот отслеживаемых спектральных ветвей от заданных значений. Эффективный коэффициент электромеханической связи ограничен снизу. Учтены ограничения на объёмы материалов, взаимную поддержку слоёв, минимальные ширины материала и зазоров, а также отделение рабочих частот от остальной части спектра. Сформулирована связанная конечно-элементная задача и получена производная собственной частоты по проектной переменной.

Ключевые слова: топологическая оптимизация, пьезоэлектрический актуатор, MEMS, собственные частоты, многослойная структура, метод конечных элементов.

I. ВВЕДЕНИЕ

Многослойный пьезоэлектрический микроактуатор описывается связанной электромеханической КЭ-моделью. Несущий слой задаёт жёсткость конструкции, а пьезоэлектрический преобразует электрическое воздействие в перемещение. Распределение материалов определяет собственные частоты и формы колебаний. Для экспериментальных AlN-актуаторов показана связь собственной формы колебаний с перемещением на единицу напряжения [1]. Поэтому частотный критерий дополнен ограничением на электромеханическую связь.

Конструкция состоит из несущего слоя, пьезоэлектрика и электродов. Толщины слоёв заданы технологией, а два независимых проектных поля определяют распределение материалов в плоскости. Подложка не входит в проектную область; её связь с устройством задаётся закреплениями в анкерных областях. Геометрия электродов фиксирована и учитывается электрическими граничными условиями.

Совместная оптимизация конструкции и размещения пьезоэлектрических актуаторов рассмотрена в [4], а настройка возбуждения и собственных форм колебаний пьезокомпозитных резонаторов - в [5]. Здесь одновременно задаются несколько собственных частот и послойные технологические ограничения.

Связанная КЭ-модель служит основой для поиска распределений материалов, обеспечивающих заданные собственные частоты и достаточную электромеханическую связь.

II. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ ПОСТАНОВКА

Используются линейные соотношения пьезоэлектричества, малые деформации и квазистатическое электрическое поле. Между слоями предполагается идеальное сцепление, электрическая инерция не учитывается. Свободные колебания описываются системой

$$\begin{bmatrix} K_{uu}(\rho) - \omega^2 M(\rho) & K_{u\varphi}(\rho) \\ K_{\varphi u}(\rho) & -K_{\varphi\varphi}(\rho) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Здесь u, φ – векторы узловых перемещений и потенциалов, а $K_{uu}, K_{\varphi\varphi}, K_{u\varphi}, K_{\varphi u}$ – механический, диэлектрический и пьезоэлектрические блоки. На поверхности без электродов задано условие $D \cdot n = 0$. При коротком замыкании разность потенциалов между электродами равна нулю. В разомкнутом режиме изолированный электрод эквипотенциален, а его суммарный свободный заряд равен нулю. Опорное значение устраняет неопределённость потенциала. В формуле (2) прежними символами обозначены матричные блоки, сформированные после наложения электрических граничных условий; матрица $K_{\varphi\varphi}$ при этом невырождена. Конденсация электрических степеней свободы даёт

$$K_{\text{eff}} = K_{uu} + K_{u\varphi} K_{\varphi\varphi}^{-1} K_{\varphi u}. \quad (2)$$

Для каждого типа электрических граничных условий формируется свой редуцированный оператор K_{eff}. В целевой функции (4) используются частоты при короткозамкнутых электродах, а разомкнутый режим необходим для вычисления коэффициента связи (5). Собственные частоты и формы колебаний

определяются из задачи $K_{\text{eff}}u_i = \omega_i^2 M u_i$. Согласованная дискретизация пьезоэлектрических блоков удовлетворяет условию взаимности $K_{\varphi u} = K_{u\varphi}^T$. Выбранный тип граничных условий не меняется в ходе оптимизации, поэтому K_{eff} и его производная вычисляются при одних и тех же условиях.

Поля ρ_s и ρ_p задают плотности материала в несущем и пьезоэлектрическом слоях. Фильтрация ограничивает минимальный пространственный масштаб, а проекция формирует дискретные маски. Для несущего слоя интерполируются упругий тензор и массовая плотность; для активного - тензоры C, e, ε и массовая плотность. Согласованная интерполяция предотвращает искусственное увеличение электромеханической связи при промежуточных плотностях [2]. Упругий, диэлектрический и пьезоэлектрический блоки имеют разные показатели штрафования.

Несущий и пьезоэлектрический слои описываются независимыми полями плотности. Поэтому один и тот же участок в плане может содержать материал в обоих слоях; конкуренции между материалами внутри одного конечного элемента нет. Вектор проектных переменных обозначен как $\rho = (\rho_s, \rho_p)$.

Для простой собственной частоты при нормировке $u_i^T M u_i = 1$ получена производная по физической элементной плотности ρ_e:

$$\frac{\partial \omega_i}{\partial \rho_e} = \frac{u_i^T (\frac{\partial K_{\text{eff}}}{\partial \rho_e} - \omega_i^2 \frac{\partial M}{\partial \rho_e}) u_i}{2\omega_i} \tag{3}$$

Формула (3) справедлива для простой положительной собственной частоты. Производная K_{eff} содержит механический, диэлектрический и пьезоэлектрический вклады. Производная по исходной проектной переменной вычисляется цепным правилом с учётом фильтрации и проекции; для каждого слоя она определяется отдельно.

Аналитические производные проверяются направленной центральной разностью для обоих проектных полей. При сближении собственных значений используется функционал инвариантного подпространства, производная которого не зависит от выбора собственных векторов внутри кластера.

III. ЗАДАЧА ОПТИМИЗАЦИИ

Выбранные формы колебаний сопоставляются на последовательных итерациях по их корреляции или по вкладу в заданное движение. Такой подход позволяет продолжать отслеживание при сближении и пересечении собственных частот, когда их порядок в спектре изменяется. Для настройки нескольких собственных частот используется целевая функция

$$\min_{\rho_s, \rho_p} F = \sum_{i \in \mathcal{T}} w_i \left[\frac{\omega_i(\rho_s, \rho_p) - \omega_i^*}{\omega_i^*}\right]^2. \tag{4}$$

Относительное нормирование выравнивает вклад разных частот, а возведение в квадрат исключает взаимную компенсацию отклонений. Коэффициенты $w_i \geq 0$ задают приоритеты целевых частот. Множество индексов отслеживаемых спектральных ветвей и положительные целевые значения $\omega_i^* > 0$ фиксируются до начала оптимизации. Целевые частоты определяются при короткозамкнутых электродах. Такие граничные условия соответствуют питанию от источника напряжения с малым выходным сопротивлением. Целевая функция безразмерна, а её градиент вычисляется по формуле (3).

Для каждой формы колебаний с простой спектрально изолированной собственной частотой коэффициент электромеханической связи ограничен снизу:

$$k_{\text{eff},i}^2 = \frac{\omega_{\text{oc},i}^2 - \omega_{\text{sc},i}^2}{\omega_{\text{oc},i}^2} \geq k_{\min}^2. \tag{5}$$

Частоты $\omega_{\text{oc},i}, \omega_{\text{sc},i}$ соответствуют одной физической форме колебаний при разомкнутых и короткозамкнутых электродах. Частоты для этих двух электрических режимов сопоставляются по корреляции соответствующих форм колебаний, а не по их положению в отсортированном спектре. В настоящей работе мерой актуации служит коэффициент (5). Ограничение на перемещение заданной точки в заданном направлении представляет альтернативный вариант критерия и далее не рассматривается. Рабочие частоты отделены от остальной части спектра заданным минимальным интервалом [3].

Для задачи оптимизации, анкеры, контактные площадки и участки электродов заданы как неизменяемые области. Для каждой маски ограничены объём материала, минимальная ширина элементов и минимальный зазор. Для технологических процессов, не допускающих свободно расположенных участков пьезоэлектрика, условие $\rho_p \leq \rho_s$ обеспечивает опору активного слоя на

несущий. В расширенный вариант задачи могут быть добавлены ограничения на механические напряжения и напряжённость электрического поля.

Таким образом, оптимизационная постановка объединяет частотный критерий, нижнюю границу электромеханической связи, спектральное отделение рабочих частот и технологические ограничения для двух слоёв.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулирована задача спектральной топологической оптимизации многослойного микроактуатора на основе связанной пьезоэлектрической КЭ-модели. Получена производная простой собственной частоты с учётом механического, диэлектрического и пьезоэлектрического блоков. Заданное ограничение на коэффициент связи исключает решения с недостаточной электромеханической связью.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Toledo J. et al. Design and Characterization of In-Plane Piezoelectric Microactuators // Actuators. 2017. Vol. 6, No. 2. 19. DOI: 10.3390/act6020019.

[2] Kim J. E., Kim D. S., Ma P. S., Kim Y. Y. Multi-Physics Interpolation for the Topology Optimization of Piezoelectric Systems // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2010. Vol. 199. P. 3153-3168. DOI: 10.1016/j.cma.2010.06.021.

[3] Giannini D., Aage N., Braghin F. Topology Optimization of MEMS Resonators with Target Eigenfrequencies and Modes // European Journal of Mechanics A/Solids. 2022. Vol. 91. 104352. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2021.104352.

[4] Molter A., Fonseca J. S. O., Fernandez L. S. Simultaneous Topology Optimization of Structure and Piezoelectric Actuators Distribution // Applied Mathematical Modelling. 2016. Vol. 40. P. 5576-5588. DOI: 10.1016/j.apm.2016.01.023.

[5] Wang X., Lin Z., Ren Y. Topology Optimization of Piezocomposite Resonator for Maximizing Excitation Strength and Synthesizing Desired Eigenmodes // Acta Mechanica Solida Sinica. 2017. Vol. 30. P. 531-539. DOI: 10.1016/j.camss.2017.10.001.

TOPOLOGY OPTIMIZATION OF A MULTILAYER PIEZOELECTRIC MICROACTUATOR WITH PRESCRIBED FREQUENCIES

D.V. Avdonyushkin, A.D. Novokshenov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia,
avdonyushkin.dmitrij@mail.ru

Abstract: a density-based topology optimization formulation is proposed for a multilayer piezoelectric microactuator. Independent design fields describe the supporting and piezoelectric layer masks at prescribed thicknesses. The objective matches selected natural frequencies to target values. A lower bound on the modal electromechanical coupling coefficient prevents solutions with insufficient electromechanical coupling. Constraints cover material fractions, layer support, minimum feature size, target-mode identification, and separation from spurious modes.

Keywords: topology optimization, piezoelectric actuator, MEMS, natural frequencies, multilayer structure, finite element method.

УДК 539.143.4

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ И ОБМЕННОГО СМЕЩЕНИЯ В НАНОЧАСТИЦАХ СО СТРУКТУРОЙ «ЯДРО–ОБОЛОЧКА» Co/CoO, НАНЕСЕННЫХ НА ГРАФЕН

Назаренко Е.С., Данилюк А.Л., Прищепа С.Л.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, katyanaz2001@gmail.com

Аннотация: в данной работе исследуется магнитное поведение наночастиц со структурой «ядро-оболочка» (Co/CoO), электрохимически осажденных на графен. Особое внимание уделяется немонотонной температурной зависимости коэрцитивной силы и обменного смещения. Показано, что немонотонная температурная зависимость коэрцитивной силы и поля обменного смещения с максимумом в диапазоне 25–50 К объясняется переориентацией моментов спинового стекла на границах раздела Co/CoO. Данная интерпретация связывается с поведением некомпенсированных спинов на границе раздела и конкуренцией между антиферромагнитным и ферромагнитным взаимодействиями в Co/CoO.

Ключевые слова: коэрцитивность, обменное смещение, графен, наночастицы CoO/Co, структуры ядро-оболочка, случайная анизотропия, магнитные корреляции, двумерный магнетизм.

ВВЕДЕНИЕ

В качестве инновационной гибридной стратегии было предложено декорирование графена магнитными наночастицами (НЧ). Массивы ферромагнитных (ФМ) НЧ на поверхности графена вызывают большой интерес у исследователей. Синтез и исследование таких магнитных композитов является весьма актуальной задачей для разработки приборов спинтроники. Данный подход объединяет высокие магнитные моменты переходных металлов с превосходной проводимостью графена, позволяя создавать перестраиваемые многофункциональные нанокомпозиты [1]. Взаимодействие между магнитными НЧ и графеновой матрицей может также приводить к возникновению новых явлений, открывая перспективы для создания передовых устройств наноэлектроники и спинтроники [2].

Сообщалось о получении ФМ НЧ со структурой «ядро–оболочка» (ядро из Co, антиферромагнитная (АФМ) оболочка из CoO) и средним размером около 40 нм методом электрохимического осаждения на подложки из меди и графена [3]. Архитектура «ядро–оболочка» представляет особый интерес: обменное взаимодействие на границе раздела между ФМ-ядром из Co и АФМ-оболочкой из CoO обеспечивает значительный эффект обменного смещения (exchange bias), способный стабилизировать магнитный порядок и преодолеть суперпарамагнитный предел даже при уменьшении размеров НЧ. Измерения петель магнитного гистерезиса M(H) в диапазоне температур вплоть до T = 4 К выявили выраженное обменное смещение H_E, а также необычную температурную зависимость как коэрцитивной силы H_C, так и величины H_E [3]. В работе [4] эти результаты были проанализированы с использованием подхода, основанного на корреляционной функции для осей случайной магнитной анизотропии. Важно отметить, что проводящая подложка оказывает существенное влияние на магнитное взаимодействие между НЧ, причем механизм этого взаимодействия меняется с температурой. Кроме того, магнитные свойства НЧ на медной подложке и на проводящем графене существенно различаются, что было продемонстрировано в работе [3].

В понимании того, как магнитные корреляции распространяются по двумерному (2D) графену, сохраняется теоретический пробел. Традиционный анализ часто опирается на модель случайной анизотропии (RAM), предполагающую наличие трехмерной (объемной) среды и быстрое экспоненциальное затухание магнитных корреляций. Однако в двумерной графеновой системе проводящая среда может поддерживать косвенные обменные взаимодействия типа Рудермана-Киттеля-Касуи-Йосиды (РККИ), которые характеризуются значительно большей дальнодействующей природой [5]. Хотя декорирование графена НЧ Co/CoO уже изучалось в контексте магнитотранспортных свойств [2], роль магнитных корреляций и обменного взаимодействия в массиве таких НЧ до сих пор не была предметом систематического исследования. В частности, оставался неясным вопрос о механизме возникновения немонотонной температурной зависимости H_C и H_E, которая не может быть объяснена наличием только обменного взаимодействия типа РККИ. В данной работе этот пробел восполняется за счет анализа обменных процессов на интерфейсе НЧ CoO/Co.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Экспериментальные данные, включающие результаты выращивания графена методом CVD, электрохимического осаждения, сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, Hitachi S4800), рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС, ESCALAB 250Xi), просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (ПЭМВР, FEI Titan 80–300) и измерения основных кривых намагничивания, были ранее представлены в работе [3].

Измерения зависимости намагниченности (M) от приложенного магнитного поля (H), выполненные с помощью вибрационного магнитометра, выявили наличие петель гистерезиса во всем исследованном диапазоне температур – от 4 К до 300 К. Петли гистерезиса были зарегистрированы после охлаждения образца в магнитном поле напряженностью +10 кЭ (направленном параллельно поверхности образца) до температуры 4 К. Более подробная информация о характеристиках образца и результатах эксперимента приведена в работе [3].

На рисунке 1 представлены температурные зависимости коэрцитивной силы и поля обменного смещения, полученные из результатов измерений петель гистерезиса намагниченности M(H) для НЧ Co/CoO на графене. Как можно видеть, максимумы H_C, H_E достигаются в области температур 25-50 К.

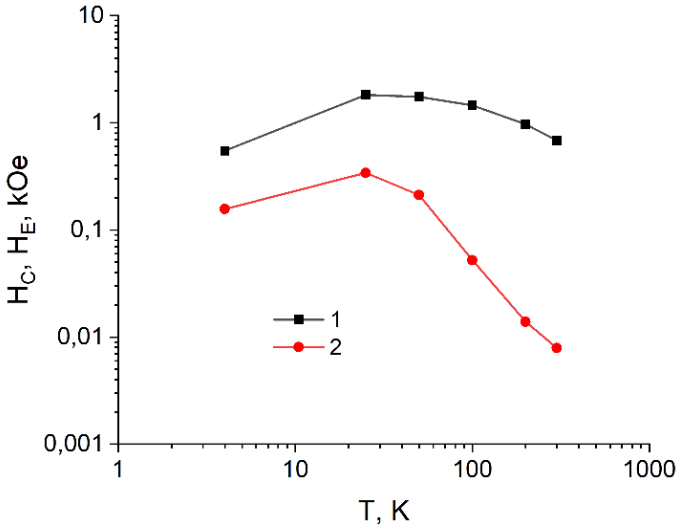


Рисунок 1. Температурные зависимости коэрцитивной силы (кривая 1) и поля обменного смещения (кривая 2) массива НЧ Co/CoO на графене

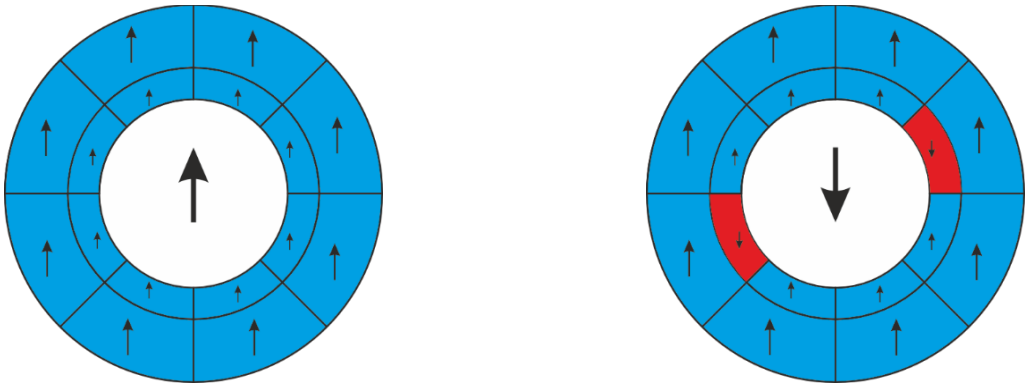
Как показано на рисунке 1, величины H_C и H_E демонстрируют немонотонную температурную зависимость с максимумом в диапазоне 25–50 К. Такое поведение указывает на сильное влияние оболочки из CoO (в частности, ее толщины) и границы раздела CoO/Co на магнитное упорядочение [6]. Явления обменного смещения и коэрцитивности в наноструктурах типа «ядро–оболочка» представляют значительный интерес, поскольку их изучение позволяет прояснить фундаментальные механизмы процессов и открывает возможности для практического применения [7]. В связи с этим основное внимание уделяется температурному интервалу 25–50 К, в котором H_C и H_E достигают своих максимальных значений. Исходя из приведенных на рисунке 1 значений H_E, можно заключить, что температура блокировки обменного смещения T_{EB} находится в диапазоне от 200 до 300 К.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ МЕХАНИЗМА НЕМОНОТОННОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ И ОБМЕННОГО СМЕЩЕНИЯ

Объяснение немонотонной температурной зависимости H_E и H_C заключается в следующем. В этом случае основную роль играет свойства интерфейса CoO/Co, где состояние спиновой системы соответствует спиновому стеклу [8]. Поскольку температура упорядочения спинового стекла (не более 75 К) ниже температуры магнитного упорядочения CoO (150 К), то антиферромагнитные моменты CoO значительно влияют на ориентацию моментов спинового стекла. Для изолированного спинового стекла ориентация моментов носит случайный и изотропный характер. При температуре порядка 5 К сильная связь с антиферромагнитной спиновой решеткой приводит к анизотропии и предпочтительной оси моментов спинового стекла вдоль оси антиферромагнитного слоя, тем самым снижая энергию конфигурации фазы, подобной спиновому стеклу, рисунок 2а.

С ростом температуры моменты спинового стекла переориентируются из своего начального состояния с минимальной энергией и будут переходить в метастабильное состояние. Здесь необходимо

учитывать два типа связи: (1) связь между моментами спинового стекла и моментами антиферромагнитной (CoO) подрешетки (J_{SG-AF}) и (2) связь между моментами спинового стекла и моментами ферромагнитной (Co) подрешетки (J_{SG-FM}). Предполагается, что $J_{SG-AF} > J_{SG-FM}$ из-за сильной анизотропии антиферромагнитного поля CoO. Переориентация моментов спинового стекла из их начального состояния с минимальной энергией переводит их в метастабильное состояние и в этом случае J_{SG-AF} ослабевает. Метастабильные моменты спинового стекла будут перемещаться вдоль ферромагнетика во время измерения гистерезиса $M(H)$, рисунок 2б.



а) б)

Рисунок 2. Схема спиновой конфигурации гетероструктуры Co/SG/CoO при T_{meas}=5 K после второго охлаждения в магнитном поле от (а) T_a = 5 K, (б) 5 K < T_a < 75 K. Внутренний круг представляет собой ядро Co, а внешний круг соответствует оболочке CoO. Слой спинового стекла образуется между Co и CoO. Стрелки в каждом слое показывают направление их намагниченности. Синий и красный цвета обозначают положительное и отрицательное направления намагниченности соответственно

Это приведет к увеличению коэрцитивной силы, так как величина H_C зависит от количества метастабильных моментов спинового стекла. При увеличении температуры наблюдается рост количества метастабильных фаз спинового стекла из-за реполяризации моментов спинового стекла в направлении противоположном полю в CoO. Таким образом при увеличении температуры обращение (переворот или переход в метастабильное состояние) некоторого количества моментов спинового стекла приведет к увеличению коэрцитивной силы. При T = 75 K, которая считается температурой максимума упорядочения спинового стекла, коэрцитивная сила достигает максимума, поскольку становится возможным полностью переориентировать моменты спинового стекла из направления их минимальной энергии. По мере того, как температура превышает 75 K, некоторые области антиферромагнитного слоя начинают переориентироваться относительно первоначального состояния. Теперь моменты спинового стекла, расположенные вблизи этих реполяризованных антиферромагнитных областей, приобретают стабильное магнитное направление, менее подверженное увлечениям при перемагничивании. Это приводит к снижению коэрцитивной силы и делает ее независимой от температуры, поскольку антиферромагнитные области CoO полностью реполяризуются.

В рассматриваемом случае H_C достигает максимума 1,82-1,75 кЭ в области 25-50 K, в области 100-300 K, H_C снижается с 1,46 до 0,68 кЭ. В данном случае не наблюдается стабилизации H_C выше 175 K. Это видимо происходит за счет снижения коэрцитивной силы самого кобальта с ростом температуры. Похожим образом ведет себя и H_E, достигая максимума при 25 K (0,34 кЭ) и снижаясь почти до 0.014 кЭ при 200 K. Намагниченность при этом монотонно снижается с ростом температуры в области 4-50 K и практически постоянна в области 50-300 K. Таким образом, можно заключить, что рассмотренная выше модель можно применить в данном случае приближенно с учетом того факта, что в данной системе CoO/Co/Gr/Cu НЧ имеют разброс по размеру, толщинам ядер и оболочек, а также наличием конгломератов или кластеров (слипшиеся по несколько CoO/Co).

Таким образом, немонотонная температурная зависимость H_C и H_E с максимумом в диапазоне 25–50 K могут быть объяснены переориентацией моментов спинового стекла на границах раздела Co/CoO. Данная интерпретация подчеркивает ключевую роль некомпенсированных спинов на границе раздела и конкуренцию между антиферромагнитным и ферромагнитным взаимодействиями, обеспечивая целостное представление о магнитном поведении наночастиц типа «ядро–оболочка».

ЛИТЕРАТУРА

[1] Tuček, J.; Błoński, P.; Ugolotti, J.; Kumar Swain, A.; Enoki, T.; Zbořil, R. Emerging chemical strategies for imprinting magnetism in graphene and related 2D materials for spintronic and biomedical applications. Chem. Soc. Rev. 2018, 47, 3899–3990.

[2] Fedotov, A.K.; Prischepa, S.L.; Fedotova, J.A.; Bayev, V.G.; Ronassi, A.A.; Komissarov, I.V.; Kovalchuk, N.G.; Vorobyova, S.A.; Ivashkevich, O.A. Electrical conductivity and magnetoresistance in twisted graphene electrochemically decorated with Co particles. Phys. E Low-Dimens. Syst. Nanostr. 2020, 117, 113790.

[3] Bayev, V.G.; Fedotova, J.A.; Kasiuk, J.V.; Vorobyova, S.A.; Sohor, A.A.; Komissarov, I.V.; Prischepa, S.L.; Kargin, N.I.; Andrulevi˘cius, M.; Przewo´znik, J.; et al. CVD graphene sheets electrochemically decorated with “core-shell” Co/CoO nanoparticles. Appl. Surf. Sci. 2018, 440, 1252–1260.

[4] Danilyuk, A.L.; Nazarenka, E.S.; Vorobyova, S.A.; Fedotova, J.A.; Prischepa, S.L. Low-temperature magnetic ordering in Co core/CoO shell nanoparticles on the copper surface. Curr. Appl. Phys. 2023, 56, 79–84.

[5] Gorman, P.D.; Duffy, J.M.; Power, S.R.; Ferreira, M.S. RKKY interaction between extended magnetic defect lines in graphene.Phys. Rev. B 2014, 90, 125411.

[6] Ghoshani, M.; Mozaffari, M.; Acet, M.; Hosseini, M.; Vashaee, D. Exploring the enhancement of exchange bias in innovative core/shell/shell structures: Synthesis and magnetic properties of Co-oxide/Co and Co-oxide/Co/Co-oxide inverted nanostructures. Nanomaterials 2023, 13, 880.

[7] Inderhees, S.E.; Borchers, J.A.; Green, K.S.; Kim, M.S.; Sun, K.; Strycker, G.L.; Aronson, M.C. Manipulating the magnetic structure of Co core/CoO shell nanoparticles: Implications for controlling the exchange bias. Phys. Rev. Lett. 2008, 101, 117202.

[8] Thomas, S.; Reethu, K.; Thanveer, T.; Myint, M.T.Z.; Al-Harthi, S.H. Effect of shell thickness on the exchange bias blocking temperature and coercivity in Co-CoO core-shell nanoparticles. J. Appl. Phys. 2017, 122, 063902.

TEMPERATURE DEPENDENCE OF COERCIVITY AND EXCHANGE BIAS IN Co/CoO CORE–SHELL NANOPARTICLES DEPOSITED ON GRAPHENE

E.S. Nazarenka, A.L. Danilyuk, S.L. Prischepa

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
katyanaz2001@gmail.com

Abstract: this work investigates the magnetic behavior of core-shell nanoparticles (Co/CoO) electrochemically deposited on graphene. Particular attention is paid to the non-monotonic temperature dependence of the coercivity and exchange bias. It is shown that the non-monotonic temperature dependence of the coercivity and the exchange bias field with a maximum in the range of 25–50 K is explained by the reorientation of spin glass moments at the Co/CoO interfaces. This interpretation is linked to the behavior of uncompensated spins at the interface and the competition between antiferromagnetic and ferromagnetic interactions in Co/CoO.

Keywords: coercivity, exchange bias, graphene, Co/CoO core-shell nanoparticles, random anisotropy, magnetic correlations, two-dimensional magnetism.

УДК 621.382.049.77

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ОХЛАЖДЕНИЯ НА НАДЁЖНОСТЬ КМОП-ПЛИС СЕМЕЙСТВА KINTEX-7 НА ОСНОВЕ ТЕПЛОВОЙ МОДЕЛИ И УРАВНЕНИЯ АРРЕНИУСА

Яцкевич Я.С.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, yana.yatskevi4@gmail.com

Аннотация: в работе рассматривается проблема теплового старения высокопроизводительных КМОП-программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) на примере микросхемы Xilinx Kintex-7 XC7K325T. Предложена методика количественной оценки влияния условий охлаждения на надёжность изделия на основе тепловой модели и уравнения Аррениуса. Выполнены расчёты температуры кристалла для двух сценариев: естественная конвекция и принудительный обдув со скоростью воздушного потока 250 LFM. Показано, что снижение температуры кристалла с 113,8 °C до 95,4 °C обеспечивает увеличение средней наработки на отказ в 2,8 раза. Результаты подтверждают критическую важность активного охлаждения для обеспечения требуемого уровня надёжности высокопроизводительных ПЛИС.

Ключевые слова: тепловое сопротивление, надёжность, уравнение Аррениуса, ПЛИС, Kintex-7, температура кристалла, срок службы, активное охлаждение.

I. ВВЕДЕНИЕ

Одной из ключевых проблем современной микроэлектроники является рост удельной рассеиваемой мощности при одновременном уменьшении размеров активных элементов [1]. Программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) нашли широкое применение в системах обработки сигналов, телекоммуникациях, промышленной автоматике и аэрокосмической отрасли. При этом требования к их надёжности непрерывно ужесточаются, особенно при эксплуатации в герметичных корпусах с ограниченным тепловым режимом.

Основным фактором, ограничивающим надёжность, является температура кристалла. Согласно модели Аррениуса, скорость протекания деградационных процессов (диффузия, электромиграция, старение диэлектрика затвора) экспоненциально зависит от температуры [2]. При этом даже незначительное снижение температуры перехода обеспечивает кратный рост времени наработки на отказ.

В большинстве инженерных методик оценка срока службы выполняется на основе усреднённых значений теплового сопротивления и мощности, что не всегда учитывает реальные условия охлаждения и тепловую инерционность конструкции. В настоящей работе предлагается подход, основанный на построении тепловой модели «кристалл – корпус – среда» и последующем расчёте срока службы по уравнению Аррениуса. В качестве объекта исследования выбрана КМОП-ПЛИС Xilinx Kintex-7 XC7K325T в корпусе FFG900.

II. МЕТОДИКА РАСЧЁТА ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА И ОЦЕНКИ НАДЁЖНОСТИ

В качестве объекта исследования выбрана микросхема Xilinx Kintex-7 XC7K325T в корпусе FFG900 (31×31 мм). Выбор обусловлен высокой логической ёмкостью (326080 логических ячеек) и широким распространением данного семейства в системах средней и высокой производительности. Технические характеристики, используемые в расчётах, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики микросхемы

Техпроцесс	28 нм
Логические ячейки	326080
Типовое тепловое сопротивление кристалл-среда (θ_{JA}) без обдува	~8,6 °C/Вт
Тепловое сопротивление кристалл-среда (θ_{JA}) с обдувом 250 LFM	~6,3 °C/Вт
Тепловое сопротивление переход-корпус (θ_{JC})	~0,24 °C/Вт
Максимальная допустимая температура кристалла ($T_{j\,max}$)	125 °C
Типичная мощность (средняя загрузка)	~8 Вт

Для описания теплового состояния микросхемы используется эквивалентная тепловая цепь, представленная на рисунке 1. В данной модели тепловой поток от кристалла к окружающей среде проходит последовательно через несколько слоёв: кристалл – источник тепловыделения, имеющий собственную теплоёмкость, но для установившегося режима рассматривается как источник теплового потока; корпус – включает в себя термоинтерфейс между кристаллом и корпусом, материал корпуса, контактные площадки и выводы; радиатор или печатная плата – внешние элементы, через которые осуществляется отвод тепла. В зависимости от конкретной конструкции, именно эта часть теплового тракта вносит наибольший вклад в общее тепловое сопротивление и является наиболее управляемой с инженерной точки зрения; окружающая среда – воздух или другая среда, в которую отводится конечное тепло.

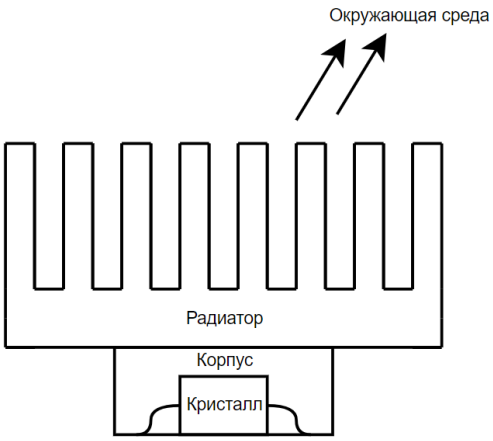


Рисунок 1. Эквивалентная тепловая цепь

Уравнение теплового расчёта, для определения температуры перехода полупроводникового компонента определяется выражением:

$$T_j = T_a + P \cdot \theta_{JA}, \quad (1)$$

где T_j – температура перехода, T_a – температура окружающей среды, P – рассеиваемая мощность компонента, θ_{JA} – тепловое сопротивление «переход-окружающая среда».

Температуру окружающей среды внутри корпуса принята равной T_a = 45 °C, что соответствует наихудшим условиям эксплуатации в герметичном промышленном корпусе.

Для прогнозирования срока службы используется уравнение Аррениуса, связывающее времена до отказа при двух температурах:

$$ln\frac{L_2}{L_1} = \frac{E_a}{k_B}\left(\frac{1}{T_{j2}} - \frac{1}{T_{j1}}\right), \quad (2)$$

где L_1, L_2 – время до отказа при температурах, T_{j1} и T_{j2}, E_a – энергия активации (для КМОП-микросхем E_a=0,6 эВ), k_B=8,617·10^{-5} эВ/К – постоянная Больцмана.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА И ОЦЕНКИ НАДЁЖНОСТИ

Расчет надежности по Аррениусу показывает во сколько раз дольше проживет микросхема с радиатором по сравнению со схемой без радиатора.

При тепловом сопротивлении кристалл-среда без обдува θ_{JA} = 8,6 °C/Вт температура перехода составляет 113,8 °C. Полученное значение очень близко к максимально допустимой температуре кристалла 125 °C, что негативно скажется на надёжности изделия. При тепловом сопротивлении кристалл-среда с обдувом 250 LFM (вентилятор среднего уровня) θ_{JA} = 6,3 °C/Вт температура перехода составляет 95,4 °C. Следовательно разница снижения температуры двух случаев составляет 18,4 °C.

После подстановки всех полученных значений в модель Аррениуса получим, что при переходе от естественной конвекции к принудительному обдуву со скоростью 250 LFM срок службы ПЛИС увеличивается примерно в 2,8 раза. Даже относительно небольшое снижение температуры на 18,4 °C обеспечивает кратный рост надёжности благодаря экспоненциальному характеру зависимости скорости деградации от температуры.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые расчёты подтверждают, что активное охлаждение является критическим фактором, определяющим достижимый уровень надёжности высокопроизводительных ПЛИС. Следует отметить, что предложенная методика имеет ряд упрощений: использование усреднённых значений θ_{JA} из технической документации не учитывает нестационарные тепловые режимы, пространственное распределение температуры по кристаллу и зависимость параметров от температуры. Тем не менее, полученные результаты дают ясное количественное представление о масштабе влияния охлаждения на надёжность и могут служить основой для принятия инженерных решений на ранних этапах проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

[1] National Research Council. The Future of Computing Performance: Game Over or Next Level? – Washington, D.C.: The National Academies Press, 2011. – 185 с.

[2] JEDEC Standard JESD85A. Methods for Calculating Failure Rates in Units of FITs. – JEDEC Solid State Technology Association, 2021. – 22 с.

[3] Ларин А.А., Новиков А.В. Основы физики надежности интегральных микросхем. – М.: Радио и связь, 2019. – 320 с.

[4] AMD (Xilinx). Kintex-7 FPGAs Data Sheet: DC and AC Switching Characteristics. DS182, v2.17, 2022. – 87 с.

[5] JEDEC Standard JESD51. Methodology for the Thermal Measurement of Component Packages (Single Semiconductor Device). – JEDEC Solid State Technology Association, 1995. – Методика тепловых измерений, определение T_j и θ_{JA}.

[6] JEDEC Standard JESD51-6. Integrated Circuit Thermal Test Method Environmental Conditions – Forced Convection (Moving Air). – JEDEC Solid State Technology Association. – Стандарт для измерения тепловых характеристик при принудительном обдуве (LFM).

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF COOLING CONDITIONS ON THE RELIABILITY OF KINTEX-7 CMOS FPGAs BASED ON A THERMAL MODEL AND THE ARRHENIUS EQUATION

Y. Yatskevich

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
yana.yatskevi4@gmail.com

Abstract: the paper addresses the problem of thermal aging of high-performance CMOS field-programmable gate arrays (FPGAs) using the Xilinx Kintex-7 XC7K325T device as a case study. A methodology is proposed for quantitative assessment of the influence of cooling conditions on device reliability based on a thermal model and the Arrhenius equation. Junction temperatures were calculated for two scenarios: natural convection and forced airflow at 250 LFM. It is shown that reducing the junction temperature from 113,8 °C to 95,4 °C provides a 2,8-fold increase in the meantime to failure. The results confirm the critical importance of active cooling for ensuring the required reliability level of high-performance FPGAs.

Keywords: thermal resistance, reliability, Arrhenius equation, FPGA, Kintex-7, junction temperature, service life, active cooling.

УДК 537.525

0D МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДУКТИВНО-СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМЫ ГЕКСАФТОРЭТАНА В РЕАКТОРЕ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ

Корякова Е.Е.[1,2], Ефремов А.М.[1]

[1]Научно-исследовательский институт молекулярной электроники, Москва, Россия,
ekoryakova@niime.ru

[2]Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

Аннотация: проведено комплексное (теоретическое и экспериментальное) исследование физико-химических свойств низкотемпературной плазмы гексафторэтана (C_2F_6), применяемой в процессах высокоселективного плазмохимического травления диэлектрических слоев. Разработана нульмерная (0D) самосогласованная кинетическая модель плазмы, учитывающая балансы концентраций нейтральных и заряженных частиц, баланс энергии электронов и тепловой баланс нейтрального газа. По сравнению с предшествующими работами модель дополнена блоком реакций многоканальной рекомбинации атомов и радикалов на стенках реактора. Продемонстрировано лучшее согласие между расчетными и экспериментальными данными по концентрациям электронов, атомов F и радикалов CF_2 в диапазоне давлений 5–35 мтор и вкладываемой мощности 100–350 Вт.

Ключевые слова: плазмохимическое травление, C_2F_6, гексафторэтан, 0D модель, кинетика плазмы, гетерогенная рекомбинация.

I. ВВЕДЕНИЕ

Современная микро- и наноэлектроника характеризуется непрерывным масштабированием элементов и переходом к пространственным архитекторикам с проектными нормами менее 7 нм [1]. Определяющим этапом формирования таких структур является плазмохимическое травление (ПХТ) в высокоплотной плазме индуктивно-связанного разряда (ИСР). Одной из наиболее ответственных операций ПХТ является формирование глубоких каналов и переходных отверстий в слоях диоксида кремния (SiO_2) относительно кремния (Si) и маскирующих слоев.

Для обеспечения высокой селективности процесса SiO_2/Si традиционно используются фторуглеродные газы (CF_4, C_2F_6, C_4F_8) [2]. Механизм селективности основан на конкурирующих процессах осаждения фторуглеродной полимерной пленки $(CF_x)_n$ и ионно-стимулированного травления подложки. На бескислородной поверхности (Si) полимерная пленка имеет большую толщину, эффективно блокируя доступ травящих агентов (атомов фтора F), в то время как на кислородсодержащей поверхности (SiO_2) кислород подложки вступает в реакцию с радикалами CF_x, образуя летучие продукты CO, CO_2, COF_2, что приводит к истончению пленки и поддержанию высокой скорости травления.

Полимеризационная способность плазмы и, как следствие, селективность процесса напрямую зависят от соотношения плотностей потоков активных частиц: фторуглеродных радикалов (CF_x, x=1-3), атомарного фтора (F) и положительных ионов. В отличие от хорошо изученных газов CF_4 и C_4F_8, гексафторэтан (C_2F_6) обладает промежуточным соотношением атомов фтора и углерода (F/C=3), что делает его перспективной плазмообразующей средой для прецизионного регулирования (поддержания оптимального баланса между скоростью и селективностью) результата травления. В то же время, физико-химические механизмы, определяющие стационарный состав плазмы C_2F_6 в условиях индукционного разряда низкого давления (1–20 мтор) изучены недостаточно. Такая ситуация затрудняет оптимизацию существующих и разработку новых технологий ПХТ с участием гексафторэтана.

В настоящее время одним из эффективных методов исследования физико-химических свойств низкотемпературной плазмы является комплексный подход, сочетающий диагностику и математическое моделирование. Это позволяет не только устанавливать эмпирические корреляции между условиями проведения ПХТ и его результатом, но и отслеживать механизмы процессов, обеспечивающих тот или иной эффект. Целью настоящей работы являлось а) создание и экспериментальная верификация самосогласованной 0D модели плазмы C_2F_6, учитывающей как объемные, так и гетерогенные (происходящие на стенках разрядной камеры) процессы; и б) установление фундаментальных взаимосвязей между условиями возбуждения плазмы (давление, вкладываемая мощность) и ее внутренними характеристиками (температура электронов, плотности радикалов и ионов).

II. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Для описания физико-химических процессов в реакторе индуктивно-связанной плазмы (ИСП) была разработана нульмерная (0D, иначе – глобальная) самосогласованная модель, оперирующая параметрами, усреднёнными по объему реактора. Модель основана на совместном численном решении системы уравнений, включающей а) уравнения непрерывности плотности потока частиц (комбинацию уравнений химической кинетики и транспорта) для всех компонентов плазмы; б) уравнения баланса энергии электронов; и в) уравнения теплового баланса нейтрального газа.

Уравнения непрерывности плотности потока частиц, определяющие изменение концентрации k-го сорта частиц N_k во времени, записывались в виде

$$\frac{dN_k}{dt} = \sum_j R_{gen,kj} - \sum_j R_{loss,kj} + R_{surf,k} + \frac{Q_0}{V}\delta_k - \frac{N_k}{\tau_g},$$

где $R_{gen,kj}$ и $R_{loss,kj}$ – скорости образования и гибели частиц k-го сорта в j-й объемной реакции; $R_{surf,k}$ – скорость гетерогенного образования/гибели на стенках реактора; Q_0 – поток напуска исходного газа; V – объем реактора; δ_k – дельта-символ Кронекера (равен 1 для исходных молекул C_2F_6 и 0 для остальных); τ_g – среднее время пребывания газа в реакторе. В расчете учитывались 14 типов частиц, а именно а) нейтральные компоненты, включающие исходный газ C_2F_6 и продукты плазмохимических реакций - CF_3, CF_2, CF, F, F_2, C_2F_5, C_2F_4; б) положительные ионы CF_3^+, CF_2^+, CF^+, F^+; в) отрицательные ионы F^-; и г) электроны. Базовая кинетическая схема в виде набора объемных реакций под действием электронного удара (упругое рассеяние, возбуждение внутренних степеней свободы, диссоциацию, ионизацию, диссоциативную ионизацию и диссоциативное прилипание электронов) и взаимодействия между «тяжелыми» частицами (перезарядка, ион-ионная рекомбинация) была заимствована из работы [3]. Константы скоростей реакций под действием электронного удара рассчитывались по формализованным уравнениям вида k = f(Te), полученным при интегрировании сечений процессов с максвелловской функцией распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ). Допустимость применения маквэлловыской ФРЭЭ для индукционных разрядов низкого давления экспериментально подтверждена в предшествующих работах.

Так как особенностью плазмы низкого (1–20 мтор) давления является увеличение средней длины свободного пробега частиц до величин, сопоставимых с характерными размерами реактора, доминирующим каналом гибели ионов, атомов и радикалов становится гетерогенная рекомбинация на стенках разрядной камеры [5]. В результате стенка становится источником продуктов рекомбинации, которые возвращаются в объем плазмы и влияют на ее состав. Так как в кинетической схеме из работы [3] такие процессы изначально отсутствовали, мы дополнили ее тремя реакционными механизмами, которые обычно учитывают при моделировании плазмы фторуглеродных газов: F + wall $\rightarrow$ 1/2F_2, CF_2 + wall $\rightarrow$ polymer/CF_2(ads.) и CF_3 + F + wall $\rightarrow$ C_2F_6/CF_4. В предположении, что все процессы гетерогенной рекомбинации протекают по механизму Или-Ридила (взаимодействие частицы из газовой фазы со стенкой, насыщенной адсорбированными частицами), советующие константы скорости $k_{wall,k}$ могут быть определены как

$$k_{wall,k} = \left(\frac{\Lambda^2}{D_k} + \frac{2V(2-\gamma_k)}{Av_{th,k}\gamma_k}\right)^{-1}$$

где Λ – диффузионная длина реактора; D_k – коэффициент диффузии; A – площадь внутренней поверхности реактора; $v_{th,k} = \sqrt{8k_BT_g/(\pi m_k)}$ – тепловая скорость частиц; γ_k – вероятности рекомбинации. Значения γ_F обычно принимают равными 0.02–0.05, а $\gamma_{CFx} \sim 0.01{-}0.1$, в зависимости от состояния поверхности.

Уравнение баланса энергии электронов [4], определяющее их среднюю энергию (температуру) имело вид

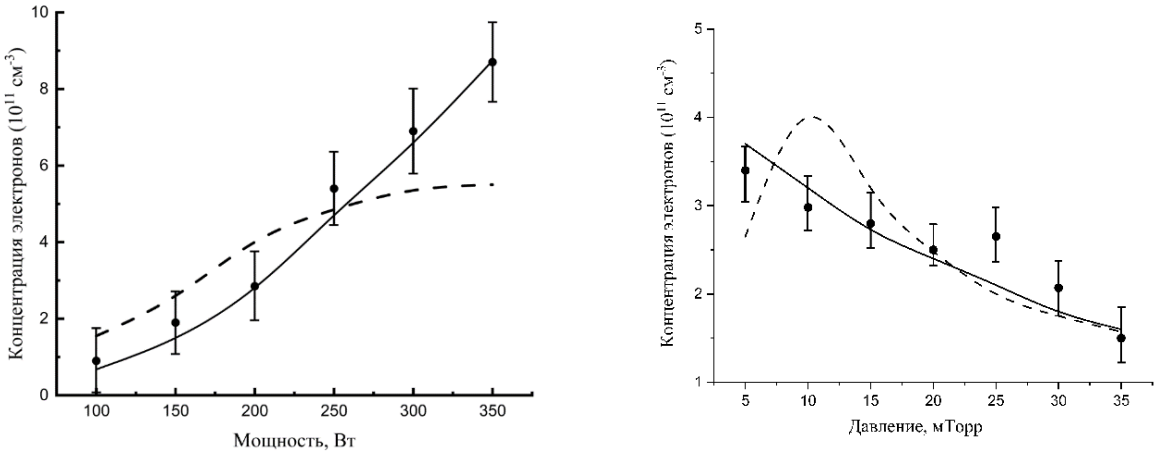
$$\frac{d}{dt}\left(\frac{3}{2}en_eT_e\right) = \frac{P_{abs}}{V} - P_{coll} - P_{wall},$$

где P_{abs} – поглощенная ВЧ мощность; n_e – концентрация электронов; P_{coll} – удельные потери мощности на упругие и неупругие столкновения электронов с тяжелыми частицами в объеме плазмы; P_{wall} – потери энергии электронов при уходе на стенки реактора с учетом амбиполярного механизма их диффузии и наличия плавающего потенциала в области контакта плазма/поверхность.

III. ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ

Верификация модели проводилась путем сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными, полученными методом зондовой и оптико-спектральной диагностики плазмы в индуктивно-связанном реакторе типа GEC Reference Cell [3]. Реактор имел цилиндрическую камеру (V ≈ 422 см^3, A ≈ 368 см^2) с кварцевым окном и плоской ВЧ-антенной. В качестве рабочего газа выступал чистый гексафторэтан (C_2F_6) с расходом Q=10 см^3/мин. Рабочие диапазоны давлений (p) и вкладываемой мощности (W) составляли 5–35 мтор и 100–350 Вт, соответственно.

На рисунке 1 представлено сравнение расчетных и экспериментальных значений концентрации электронов. Можно видеть, что проведенная нами корректировка кинетической схемы обеспечила значительно лучшее, по сравнению с результатами работы [3] согласие расчета с экспериментом, что свидетельствует о явном прогрессе адекватности модели. Что касается характера зависимостей, наблюдаемые тенденции имеют логичное объяснение с точки зрения законов плазмохимии и результатов, полученных ранее для других фторуглеродных газов. Так, увеличение n_e с ростом вкладываемой мощности отражает интенсификацию ионизационных процессов из-за роста средней энергии (температуры) электронов. Последний параметр однозначно определяет изменения констант скоростей ионизации. Снижение концентрации электронов с ростом давления является типичным эффектом для всех электроотрицательных газов и связано с изменением баланса скоростей ионизации и диссоциативного прилипания. В частности, рост давления всегда сопровождается снижением температуры электронов и, соответственно, констант скоростей ионизации, что подавляет образование электронов в объеме плазмы. В то же время константы скоростей диссоциативного прилипания не чувствительны к снижению T_e в силу низких пороговых энергий соответствующих процессов. Поэтому имеет место увеличение частоты гибели электронов в процессах диссоциативного прилипания из-за увеличения концентраций электроотрицательных фторсодержащих частиц.



а) б)

Рисунок 1. Зависимость концентрации электронов от вкладываемой мощности (а, при p = 10 мтор) и давления (б, при W = 200 Вт). Точки – эксперимент из работы [3]; пунктирная линия – расчет из из работы [3]; сплошная линия – наш расчет

В таблице 1 приведено сопоставление расчетных концентраций атомов F и радикалов CF_2 с результатами измерений методом оптической эмиссионной спектроскопии. Представленные данные также свидетельствуют о целесообразности проведённой корректировки кинетической схемы и улучшении качества модели. Для полного подтверждения данного вывода необходимы систематические экспериментальные данные по концентрациям нейтральных частиц в широком диапазоне условий возбуждения плазмы.

Таблица 1. Сравнение расчетных и экспериментальных концентраций нейтральных частиц при P = 10 мтор и W = 300 Вт

Параметр	Модель [3]	Эксперимент [3]	Наша модель
Концентрация F, $см^{-3}$	$6{,}25 \cdot 10^{10}$	$10{,}75 \cdot 10^{10}$	$10{,}1 \cdot 10^{10}$
Концентрация CF_2, $см^{-3}$	$0{,}87 \cdot 10^{13}$	$1{,}76 \cdot 10^{13}$	$1{,}54 \cdot 10^{13}$

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена самосогласованная нульмерная (0D) кинетическая модель плазмы C_2F_6, описывающая объемные и гетерогенные (протекающие на стенке разрядной камеры) физико-химические процессы. Модель не учитывает травление материала подложки, но характеризует плазму как источник активных частиц.

Проведена верификация модели по экспериментальным (зондовым и оптико-спектральным) данным, полученным на ИСП-реакторе GEC Reference Cell. Продемонстрировано лучшее, по сравнению с предшествующей работой [3], качественное и количественное согласие результатов моделирования с экспериментом по концентрациям электронов, атомов F и радикалов CF_2 в диапазоне давлений 5–35 мтор и мощностей 100–350 Вт.

Установлено, что гетерогенная рекомбинация атомов F на стенках разрядной камеры является ключевым процессом, определяющим состав нейтральной компоненты плазмы C_2F_6 при низких давлениях. Верифицированная кинетическая схема может быть использована как элемент более сложных пространственно-разрешенных моделей ИСП-реакторов.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Красников Г. Я., Возможности микроэлектронных технологий с топологическими размерами менее 5 нм, Наноиндустрия Т. 13. No. S5-1(102) (2020), 13-19.

[2] van Dijk, Jan & Kroesen, [et al.], Plasma modelling and numerical simulation. Journal of Physics D: Applied Physics. 2009. 42. 190301. 10.1088/0022-3727/42/19/190301.

[3] Ho P. [et al.]. Modeling the plasma chemistry of C2F6 and CHF3 etching of silicon dioxide, with comparisons to etch rate and diagnostic data // J. Vac. Sci. Technol. A. 2001. V. 19(5). P. 2344–2357.

[4] Lieberman M.A., Lichtenberg A.J. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing. Wiley, 2005.

[5] Kolasinski, Kurt. Surface science: foundations of catalysis and nanoscience. 2019.

0D MODELING OF INDUCTIVELY-COUPLED HEXAFLUOROETHANE PLASMA IN PLASMA CHEMICAL ETCHING REACTOR

E.E. Koryakova[1,2], A.M. Efremov[1]

[1]MERI, Moscow, Russia, ekoryakova@niime.ru

[2]MIPT, Dolgoprudny, Russia

Abstract: a comprehensive theoretical and experimental study of the characteristics of low-temperature hexafluoroethane (C_2F_6) plasma used in the processes of highly selective plasmochemical etching of dielectric layers has been carried out. A zero-dimensional (0D) self-consistent kinetic model has been developed that takes into account the density balances of neutral and charged particles, the energy balance of electrons, and the thermal balance of a neutral gas. The model is complemented by a block of heterogeneous reactions of recombination of radicals and atoms on the reactor walls. A satisfactory agreement between model-predicted and experimental data was demonstrated for gas pressures of 5-35 mtorr and input powers of 100-350 W.

Keywords: plasma chemical etching, C_2F_6, hexafluoroethane, 0D model, plasma kinetics, heterogeneous recombination.

УДК 621.382.8.029.64:004.942

ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ УСИЛИТЕЛЯ X-ДИАПАЗОНА

Журавлёв В.И., Наумович Н.М., Стежко И.К., Колбун В.С.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, vadzh@bsuir.by

Аннотация: на основе топологической модели конструктива и стационарной тепловой модели заданы начальные и граничные условия реализована феноменологическая модель нестационарного нагрева с изменяемой функцией мощности источника мощного усилителя X-диапазона. Определены целевые показатели и настройка временных шагов для мониторинга температуры компонентов. Показано, что время выхода компонентов на стационарный режим составляет 400–450 с, а тепловые градиенты не превышают критических значений. Модель позволяет прогнозировать нагрев компонентов и оптимизировать режимы работы и конструкцию передающего тракта без дополнительных временных и вычислительных затрат.

Ключевые слова: усилитель X-диапазона; тепловое поле; феноменологическая модель; нестационарный теплоперенос; оптимизация теплового режима, градиент температуры.

I. ВВЕДЕНИЕ

Современные мощные усилители X-диапазона находят широкое применение в радиолокации, системах связи и радиоэлектронной борьбе, где к ним предъявляются жёсткие требования по выходной мощности, надёжности и тепловому режиму. Интенсификация тепловыделения при повышении удельной мощности передающего тракта приводит к росту тепловых нагрузок на электронные компоненты, что делает задачу оценки и прогнозирования теплового состояния конструкции одной из ключевых при проектировании. При этом наибольший интерес представляет не только стационарное распределение теплового поля, но и динамика его формирования, поскольку именно переходные процессы разогрева определяют пиковые температуры, тепловые градиенты и, как следствие, ресурс и безотказность работы изделия [1].

Существующие подходы к тепловому моделированию радиоэлектронных средств, основанные на детальном численном решении задач теплопереноса, обладают высокой точностью, однако требуют значительных временных и вычислительных затрат, особенно при многовариантном анализе и оптимизации конструкции [2,3]. В условиях итерационного проектирования это ограничивает возможность оперативной оценки нестационарных тепловых режимов [4]. В связи с этим актуальной является разработка моделей, которые, сохраняя адекватность физике теплопереноса, позволяют существенно упростить анализ динамического распределения теплового поля. Феноменологическая модель чаще всего описывает эмпирическую зависимость от явлений друг к другу, таким образом, что согласуется с фундаментальной теорией теплопереноса. Разрабатываемая модель отображает в основном наблюдаемые свойства объектов и не затрагивает их внутренние глубинные механизмы. Далее рассматриваются нестационарные переходы из одного состояния в другое без детального рассмотрения глубинного механизма этих переходов. Использование такой модели позволяет оптимизировать конструкцию и режимы работы усилителя с учётом динамики протекающих процессов без дополнительных временных и вычислительных затрат.

II. УСЛОВИЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ

При анализе переходных процессов обычно используются известные краевые условия, такие как параметры окружающей среды или установившегося режима. Для задания граничных условий использована топологическая модель конструктива передающего тракта, которая является основой имитационной модели распределения теплового поля, полученная ранее при построении стационарной тепловой модели. В рассматриваемой модели аналогично задаются открытые граничные условия второго рода с возможностью стационарного, ламинарного и турбулентного видов внутреннего теплообмена. В качестве начальных значений инициализации установлены такие же начальные условия, как у предварительно полученной имитационной модели с установленной начальной сеткой для решения численным методом конечных элементов. Дополнительно заданы условия нестационарного нагрева с возможностью задания функции изменения мощности источника. Далее используется такой же информационный параметр оценки нагрева электронного компонента – температура перехода электронных компонентов.

На основании проведённого анализа построена топологическая модель конструктива усилителя, в котором основными источниками повышенной рассеиваемой мощности являются микросхемы усилителей ASL4046 и ASL4047. Проведено упрощение первоначальной топологической модели с целью уменьшения количества конечных элементов за счёт удаления мелких твердотельных элементов, не оказывающих значительно вклада в общий процесс теплопереноса.

Анализ переходных процессов разогрева обычно связан с изменением краевых условий теплообмена, такие изменения можно устанавливать с введением специальных атрибутов переходных процессов. В полученной модели атрибуты переходных процессов устанавливаются как прикреплённые свойства топологических моделей компонентов для учёта изменения температуры твёрдого тела (кондуктивный теплообмен) и окружающей среды (конвективный теплообмен) со временем. Использование целевых показателей является основополагающим принципом для анализа переходных процессов, поскольку именно с их помощью можно наблюдать, каким образом значения переменных изменяются со временем. Значения целевой величины рассчитываются в конце каждого временного шага и используются для построения кривых зависимости значений переменных от времени. В получаемой модели возможно использовать атрибуты переходных процессов для изменения тепловых параметров, таких как рассеиваемая мощность или температура окружающей среды в течение периода анализа переходных процессов.

В качестве глобальной цели установлены сходимости по средним значениям давления, скорости и температуре воздушных потоков, а также температуры твёрдых тел. В дополнение к глобальным целям активированы цели в таблицах свойств для мониторинга значений, представляющих основной интерес: средние и максимальные значения температуры компонентов, объёмных потоков и давления конвективного переноса вокруг элементов конструкции. Созданы точечные цели для мониторинга температуры корпусов и кристаллов микросхем усилителя и отдельных элементов конструкции для установления динамики распространения теплового поля.

Значения целевых функций рассчитываются в конце каждого временного шага. В полученной модели временные шаги могут быть определены для всего переходного периода или весь переходный период времени может быть разделён на временные интервалы и временные шаги определены в этих временных интервалах. Это сделано для того, чтобы задавать небольшие временные шаги в начале переходного процесса и более длинные временные шаги в конце переходного процесса. Для этого подходит возрастающее линейно или логарифмическое распределение модельного времени. По умолчанию временная область модели содержит равномерные временные интервалы. В разрабатываемой модели использованы равномерные распределения временных шагов для более тщательного отслеживания изменений, вызванных применяемым профилем переходных процессов. Таким образом, можно вручную определять небольшие временные шаги при значительных изменениях протекающих процессах и относительно большие шаги, когда вероятность качественных изменений мала. Временная сетка модели также определяет, когда можно сохранять промежуточные решения.

Модель теплопереноса всей топологии конструкции включает в себя теплопроводность и внешнюю конвекцию с учётом переходных тепловых процессов. При необходимости влияние любого из механизмов теплопереноса можно уменьшить или отключить для учёта специфических условий эксплуатации (например, условия космического пространства). Общее время разогрева при моделировании текущей конструкции первоначально задано 1000 секунд.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты моделирования разогрева модуля усилителя показывают, что время достижения стационарного режима его компонентами составляет около 400-450 с (рис. 1). После этого температура практически не изменяется, если подаваемая мощность остаётся прежней. В дальнейшем температура компонентов практически находится в допустимых пределах при выходе на стационарный режим (рис. 2). При моделировании нестационарного нагрева установлено, что возникающие тепловые градиенты не превышают критических значений для корпусов и кристаллов микросхемы передающего тракта ASL 4047 (рис.3).

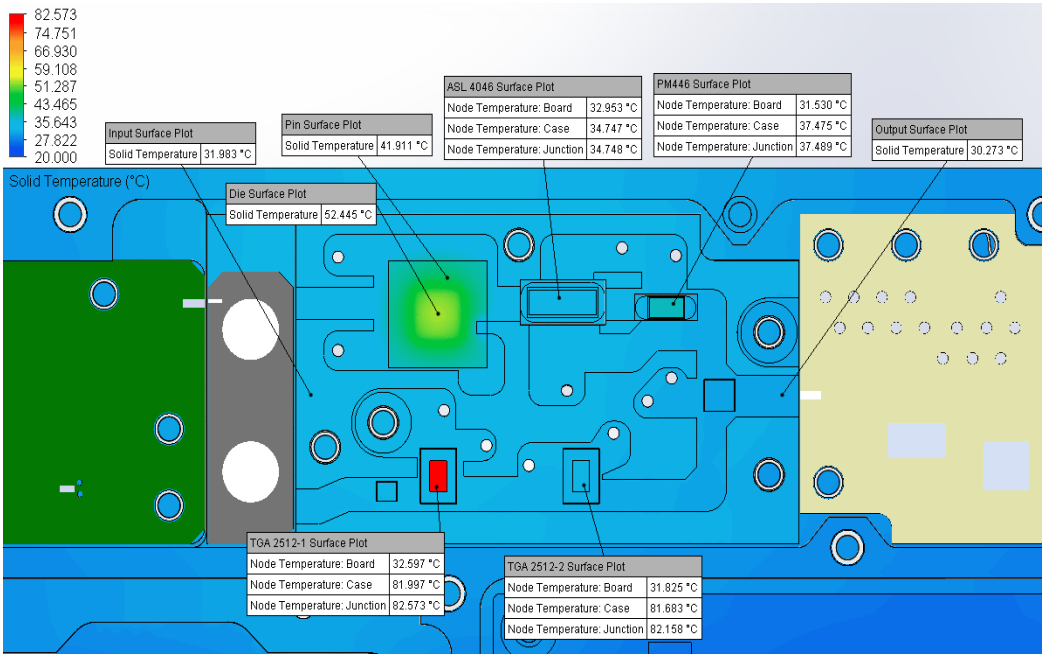


Рисунок 1. Температурные профили компонентов усилителя

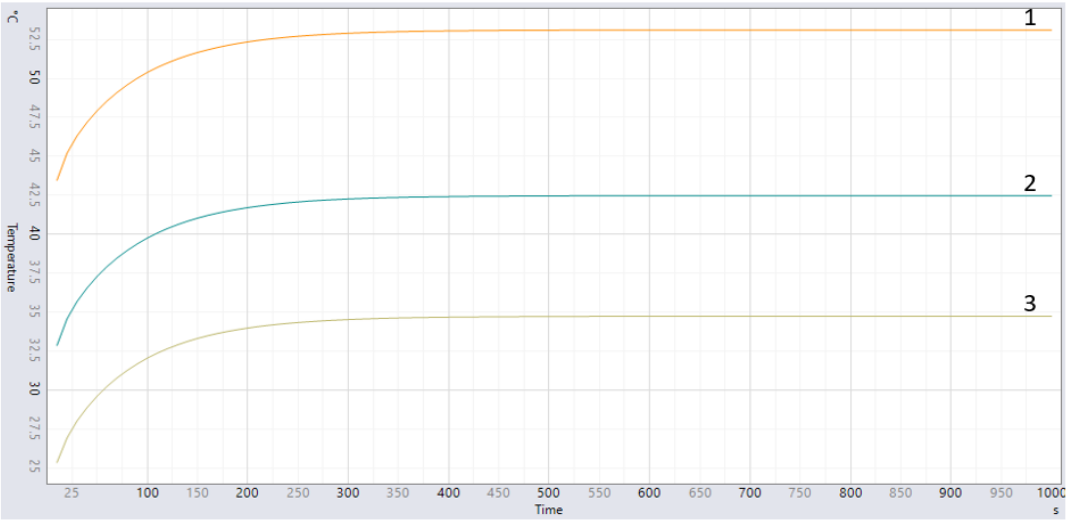
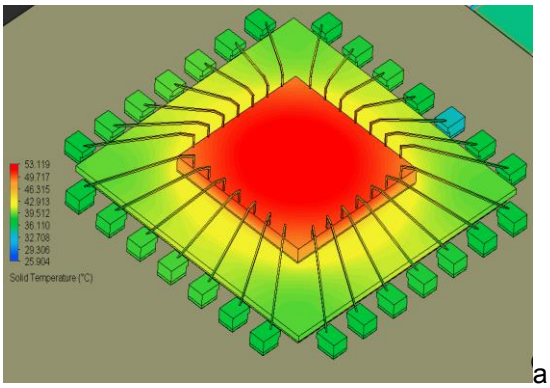
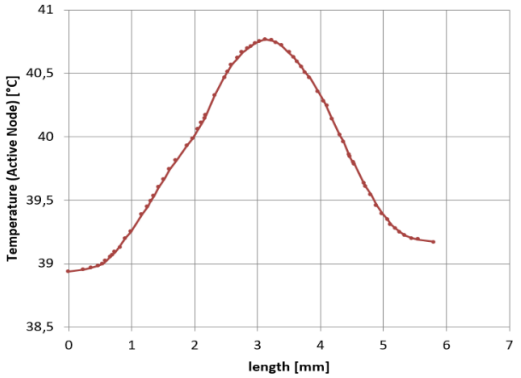


Рисунок 2. Динамика изменения максимальной температуры микросхем усилителя

1 – кристалл ASL 4047; *2* – корпус кристалла ASL 4047; *3* – кристалл ASL 4046



а



б

Рисунок 3. Распределение *(а)* и градиенты температуры *(б)* при нестационарном разогреве микросхемы ASL4047

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, используя численное моделирование, можно оценить динамическое распределение теплового поля платы усилителя. При этом характер роста температуры отдельных компонентов, в целом, одинаков с разницей в величинах разогрева.

На основании итерационных результатов моделирования возможна оптимизация режимов работы передающего такта и параметров конструкции до её непосредственного изготовления с учётом динамики протекающих процессов без дополнительных временных и вычислительных затрат.

ЛИТЕРАТУРА

[1] S. Gurung and S. Prasad Electro-Thermal Behavior of AlGaN/GaN HEMTs on SiC, Si, Sapphire and Diamond Substrates / 2026 IEEE International Conference for Convergence in Computing Technology (I3CTCON), Lonavala, 2026, pp.1-7

[2] O.T. Kristensen, T. M. J. Nilsson, A. Divinyi, J. Bremer and M. Thorsell Characterization and Modeling of Dynamic Thermal Coupling in GaN MMIC Power Amplifiers / IEEE/MTT-S International Microwave Symposium – IMS 2024, Washington, USA, 2024. – P.1053-1056.

[3] Z.-D. Wang, G.-D. Su and J. Liu A 15-W X-Band Gan MMIC Power Amplifier with Thermal Design / IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO), Tianjin, China, 2025, pp. 1-3. – P.73-91.

[4] K.R. Bagnall and E.N. Wang Theory of Thermal Time Constants in GaN High-Electron-Mobility Transistors // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – vol. 8, no. 4. – P 606-620.

PHENOMENOLOGICAL MODEL OF THE DYNAMIC DISTRIBUTION OF THE HEAT FIELD IN AN X-BAND AMPLIFIER

V. Zhuravliov, N. Naumovich, I. Stezhko, V. Kolbun

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus, vadzh@bsuir.by

Abstract: the phenomenological model of transient heating with a variable power function for the power source of a high-power X-band amplifier based on a topological model of the circuit and a steady-state thermal model with initial and boundary conditions specified has been implemented. Target parameters and time step settings for monitoring component temperatures have been determined. It is shown that the time required for the components to reach steady state is 400–450 s, and the thermal gradients do not exceed critical values. The model allows to predict component heating and optimize operating modes and the design of the transmission path without additional time and computational resources.

Keywords: X-band amplifier; thermal field; phenomenological model; transient heat transfer; thermal optimization; temperature gradient.

УДК 621.384.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВЕРИФИКАЦИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ МИКРОБОЛОМЕТРИЧЕСКОГО ПИКСЕЛЯ

Левчук Д.С.[1], Соловьёв Я.А.[1], Видрицкий А.Э.[1], Стемпицкий В.Р.[2]

[1] ОАО «ИНТЕГРАЛ» -управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Минск, Республика Беларусь, DLevchuk@integral.by

[2] Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь

Аннотация: в данной работе проведен расчет оптических характеристик многослойных структур микроболометрического пикселя методом конечных элементов. Исследованы такие параметры, как пропускание, поглощение и отражение ИК-излучения в диапазоне длин волн 8–12 мкм.

Ключевые слова: неохлаждаемый тепловой детектор болометрического типа, микроболометр, чувствительный элемент, моделирование, поглощение, LWIR.

I. ВВЕДЕНИЕ

Все нагретые тела, имеющие температуру отличную от абсолютного нуля, излучают энергию (лучистая энергия). Это излучение называется тепловым, т.к. вызвано превращением тепловой энергии колебательных и вращательных движений молекул, а также при переходе электронов внешней орбиты атомов с одного уровня на другой в энергию излучения [1].

Выделяют четыре области прозрачности атмосферы в ИК-области, где излучение слабо поглощается и рассеивается:

– ближний ИК диапазон (Near - infrared (NIR)) - 0,72 ÷ 1,1 мкм,

– коротковолновый ИК диапазон (Short-wave infrared (SWIR)) - 1,2 ÷ 2,5 мкм,

– средневолновый ИК диапазон (Mid-wave infrared (MWIR)) - 3 ÷ 5 мкм,

– длинноволновый ИК диапазон (Long-wave infrared (LWIR)) - 8 ÷ 14 мкм.

Регистрация ИК-излучения в длинноволновом диапазоне LWIR осуществляется с помощью фотоприемного устройства, построенного на основе матрицы микроболометров. Микроболометр является тепловым приёмником, рабочий элемент реагирует на изменение температуры, вызванное поглощённой электромагнитной энергией [2]. Матрица таких элементов формирует двумерный массив пикселей, каждый из которых преобразует локальный тепловой поток в электрический сигнал, что в совокупности позволяет получать пространственное распределение температуры.

Отдельный термочувствительный пиксель микроболометра представляет собой сложную многослойную структуру, которая включает поглощающий слой, термочувствительный резистивный элемент, теплоизолирующую мембрану, подвешенную над подложкой на тонких опорных «ножках», а также отражающий элемент, образующий оптический резонанс. Такая архитектура обеспечивает одновременно высокое поглощение ИК-излучения, низкую теплопроводность связи с подложкой и, как следствие, высокую температурную чувствительность пикселя (рис 1).

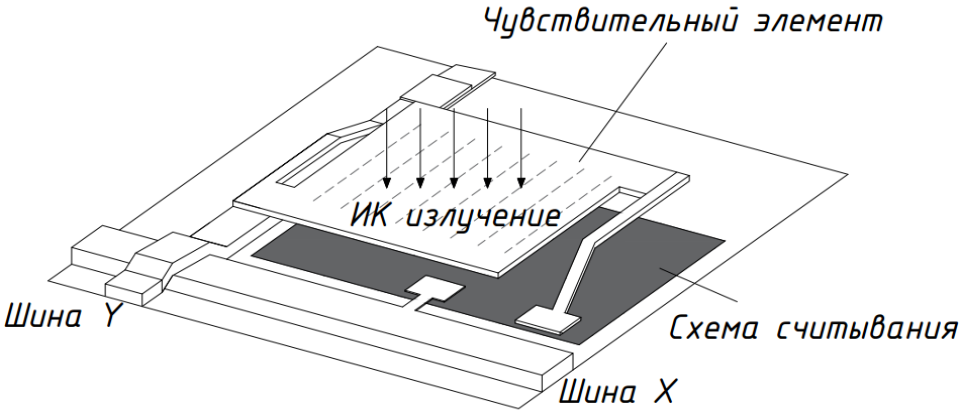


Рисунок 1. Конструкция термочувствительного пикселя микроболометра [3]

Для получения требуемых характеристик пикселя необходимо, максимальное оптическое поглощение структуры пикселя в ИК диапазоне от 8 до 12 мкм, минимизация и, по возможности, исключение деформаций многослойных трехмерных структур под воздействием внутренних остаточных напряжений и температуры, оптимальное соотношение тепловой массы поглощающей части и термоизолирующего резистора (подвеса) пикселя для обеспечения чувствительности, быстродействия и шумовых характеристик.

II. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТА

Расчет оптических спектров поглощения, отражения и рассеивания, для микроболометрического пикселя размером 25 мкм проводился в САПР «COMSOL Multiphysics» при помощи встроенных модулей «Electromagnetic Waves, Frequency Domain», «Wavelength Domain» [4].

Для верификации разработанной модели, были приняты следующие допущения:

- в экспериментальных структурах заменили воздушный зазор на твердый материал с приемлемой оптической пропускной способностью в среднем ИК-диапазоне (длина волны от 3 до 50 мкм), SiN_X;

- для эталонных структур сопоставили расчетные данные с данными непосредственных измерений на Фурье-спектрометре;

- получение приемлемой сходимости расчетных данных с результатами измерений образцов, означало, что и для реальных структур с воздушным зазором модель будет так же достоверна.

Для оценки корректности полученной модели, в САПР «COMSOL Multiphysics» были выполнены расчеты коэффициентов поглощения многослойных структур с толщинами, используемых на экспериментальных образцах. Последовательность слоев, используемая для расчетов, представлена на рис. 2.



Рисунок 2. Последовательность конструктивных слоёв активной области микроболометрического пикселя

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Спектр поглощения микроболометрической структуры с имитацией вакуумного зазора и результаты измерений на Фурье-спектрометре представлены на рис. 3.

Из рис. 3 экспериментальная и рассчитанная структура микроболометрического пикселя имеет максимальное расхождение до 10 %. Провал на 9 мкм обусловлен наличием кислородной среды при изучение тонких пленок на Фурье-спектрометре и последующим определением коэффициентов n и k методом Ньютона – Рафсона.

Исходя из результатов сравнения измеренных и рассчитанных значений многослойных структур коэффициента поглощения, следует вывод о возможности проведения в достаточной степени достоверных расчётов коэффициентов поглощения структур термочувствительной ячейки микроболометрического пикселя в САПР «COMSOL Multiphysics». На основе результатов был рассчитан спектр поглощения активной области микроболометрического пикселя с наличием вакуумного зазора рис. 4.

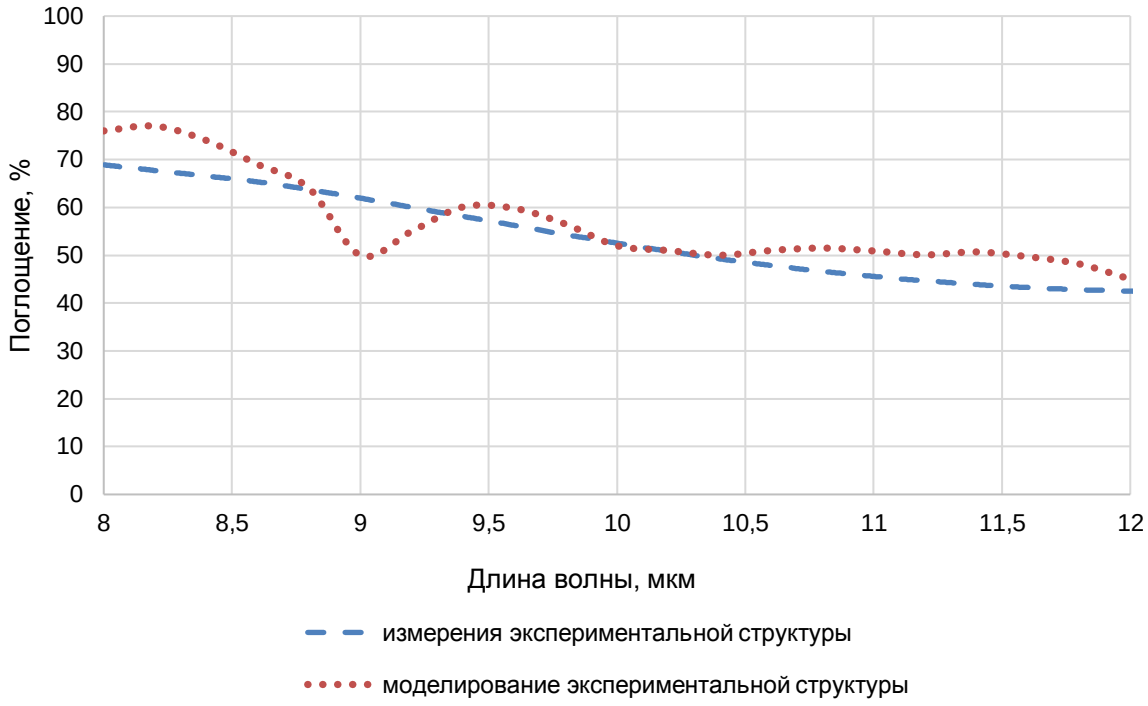


Рисунок 3. Результаты моделирования и верификации микроболометрической структуры

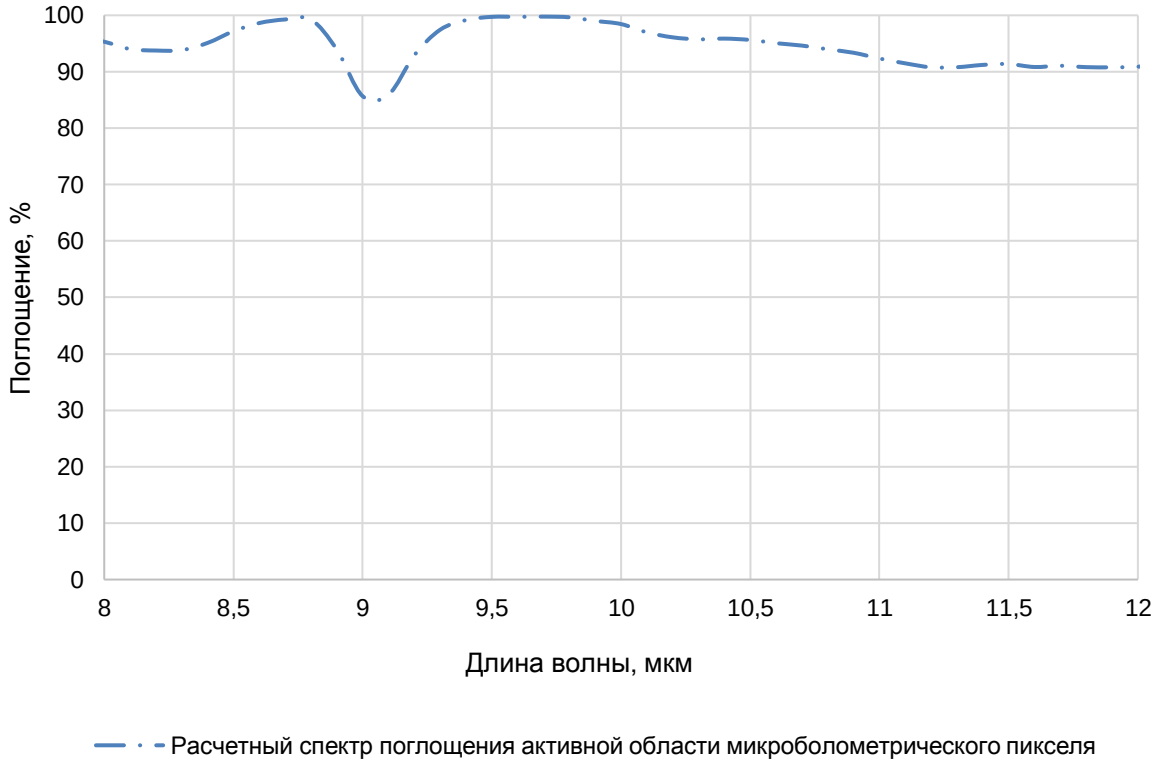


Рисунок 4. Результаты моделирования микрометрической структуры с вакуумным зазором

Исходя из результатов компьютерных расчётов, спектр поглощения активной области микроболометрического пикселя лежит в пределах от 90 до 100 %, что обеспечивает сбалансированную спектральную характеристику. Среднее поглощение для диапазона длин волн 8 -14 мкм составило 92%.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построена компьютерная модель оптических спектров поглощения, отражения и рассеивания микроболометрического пикселя с твердотельным зазором между пикселем и подложкой. Проведена верификация расчета с экспериментальной структурой. Коэффициент расхождения экспериментальной и рассчитанной структуры составил до 10 %. Рассчитана активная область микроболометрического пикселя процент поглощения для диапазона длин волн 8 - 12 мкм составил от 90 до 99 %, среднее значение поглощения 92 %. САПР «COMSOL Multiphysics» позволяет проводить расчеты спектров отражения, поглощения и пропускания для многослойных тонкопленочных структур.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Большая российская энциклопедия 2004–2017, электронная версия https://old.bigenc.ru/physics/text/3143472

[2] Web of Science. – URL: https://www.sensorsinc.com/technology/swir-and-the-u-2/ (дата обращения 03.08.2026)

[3] Tempelhahn, A. Shutter-less calibration of uncooled infrared cameras / A. Tempelhahn, H. Budzier, V. Krause, G. Gerlach // Journal of Sensors and Sensor Systems. – 2016. – Vol. 5. – P. 9–16. – DOI 10.5194/jsss-5-9-2016.

[4] Левчук, Д. С. Моделирование зависимости спектра поглощения микроболометрического пикселя от высоты вакуумного зазора в САПР «COMSOL Multiphysics» / Д. С. Левчук, В. Ю. Клыбик, А. Н. Фундаренко, А. Е. Жамойть, Я. А. Соловьёв // XXVIII Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и системам технического зрения (Москва, 27–29 мая 2026 г.). – Москва, 2026.

MODELING AND VERIFICATION OF THE COMPUTER CALCULATION OF THE ABSORPTION COEFFICIENT OF A MICROBOLOMETRIC PIXEL

D. Liauchuk[1], Ya. Solovjov[1], A. Vidrytski[1], V. Stempitsky[2]

[1] JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company, Minsk, Belarus, DLevchuk@integral.by

[2] Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Abstract: this paper presents the calculation of the optical characteristics of multilayer structures of a microbolometric pixel using the finite element method. Parameters such as transmission, absorption, and reflection of IR-radiation in the wavelength range of 8–12 μm are studied.

Keywords: uncooled bolometric-type thermal detector, microbolometer, sensitive element, modeling, absorption, LWIR.

УДК 621.3.049.77

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОРПУСИРОВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ

Видрицкий А.Э.[1], Савко А.И[1]., Левчук Д.С.[1], Ланин В.Л.[2]

[1]ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Минск, Республика Беларусь, AVidritskiy@integral.by

[2]Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь

Аннотация: представлена математическая модель процесса ультразвуковой пайки кристаллов в корпус, позволяющая прогнозировать прочность соединения в зависимости от мощности ультразвукового воздействия и длительности процесса. Модель учитывает кинетику разрушения оксидной плёнки, формирование площади контакта и деградацию соединения при избыточной введённой энергии. Разработан программный модуль на языке MATLAB для визуализации технологического окна режимов пайки.

Ключевые слова: ультразвуковая пайка, монтаж кристаллов, моделирование, прочность соединения.

I. ВВЕДЕНИЕ

Монтаж кристаллов в корпус является критически важной технологической операцией в производстве электронных компонентов, определяющей их надёжность, тепловые характеристики и электрические параметры [1]. Для микроболометров и силовых транзисторов, в том числе выполненных по каскодной схеме «кристалл на кристалле», требования к качеству паяного соединения особенно высоки: необходимы минимальное тепловое сопротивление, отсутствие пустот и высокая механическая прочность при термоциклировании [2].

Ультразвуковая пайка представляет собой бесфлюсовый процесс, при котором ультразвуковые колебания частотой 20–60 кГц вводятся в расплав припоя через специализированный инструмент. Возникающие при этом кавитация и микропотоки разрушают оксидные плёнки на паяемых поверхностях и обеспечивают полное смачивание [3, 4]. Применение частот 50–60 кГц позволяет полностью исключить операцию нанесения и отмывки флюса, что критически важно для герметичных корпусов микроболометров, где остатки флюса являются источником газовыделения [3].

Основной проблемой при внедрении ультразвуковой пайки является узкое технологическое окно: при недостаточной введённой энергии оксидная плёнка разрушается не полностью и соединение получается непрочным, а при избыточной энергии наблюдается эрозия тонкоплёночной металлизации и деградация соединения [5, 6]. В связи с этим актуальной задачей является разработка математической модели, позволяющей прогнозировать оптимальные режимы пайки до проведения дорогостоящих натурных экспериментов.

Целью настоящей работы является разработка математической модели процесса ультразвуковой пайки кристаллов в корпус и программной реализации для оптимизации технологических режимов.

II. ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА

2.1. Механизм ультразвуковой активации

При прохождении упругих колебаний ультразвуковой частоты через расплав припоя возникает кавитация – образование и схлопывание микропузырьков, создающих локальные ударные волны и микропотоки [4]. Эти явления приводят к механическому разрушению оксидных плёнок на поверхности паяемых материалов и обеспечивают контакт чистого металла с расплавом припоя.

Скорость разрушения оксидной плёнки пропорциональна введённой ультразвуковой энергии и описывается экспоненциальной зависимостью:

$$R(t) = \exp(-k_{ox} \cdot P \cdot t),$$

где $R(t)$ – часть остаточной оксидной плёнки, k_{ox} – коэффициент эффективности ультразвуковой активации, 1/(Вт·с); P – мощность ультразвукового воздействия, Вт; t – время воздействия, с.

2.2. Формирование площади контакта

Площадь металлургического контакта формируется по мере удаления оксида и смачивания поверхности припоем. Доля сформированной площади контакта описывается выражением:

$$\mathrm{A(t)} = 1 - \exp\left(-\frac{\mathrm{P{\cdot}t}}{\mathrm{E_s}}\right),$$

где E_s – характеристическая энергия формирования контакта, Дж.

2.3. Деградация при избыточной энергии

При превышении оптимальной введённой энергии $E_{opt} = P * t$ начинается кавитационная эрозия металлизации и деградация соединения. Коэффициент деградации:

$$K(\mathrm{E}) = \exp\left(-\frac{\max(\mathrm{E}-\mathrm{E_{opt}},0)}{\mathrm{E_d}}\right),$$

где E_d – характеристическая энергия деградации, Дж.

2.4. Итоговая модель прочности

Прочность соединения на сдвиг определяется как произведение максимальной прочности на факторы формирования контакта и деградации:

$$\sigma(\mathrm{P,t}) = \sigma_{\max} \cdot \mathrm{A(t)} \cdot \mathrm{K(E)},$$

где σ_{max} – предельная прочность соединения, МПа.

Локальная температура в зоне пайки при ультразвуковом воздействии:

$$\mathrm{T(t)} = \mathrm{T_{base}} + \alpha \cdot \mathrm{P} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{\mathrm{t}}{\tau_\mathrm{T}}\right)\right),$$

где T_{base} – температура расплава припоя, °C; α – коэффициент локального нагрева, °C/Вт; τ_T – постоянная времени теплоотвода, с.

III. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

3.1. Структура программного модуля

На основе разработанной модели предложен программный модуль на языке MATLAB, включающий четыре вычислительных блока: кинетика разрушения оксида, расчёт прочности, построение технологического окна и анализ локального перегрева. Параметры модели приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры математической модели

Параметр	Обозначение	Значение	Ед. изм.
Максимальная прочность на сдвиг	σ_{max}	30	МПа
Коэффициент активации	k_{ox}	0,08	1/(Вт·с)
Характеристическая энергия контакта	E_s	8	Дж
Оптимальная введённая энергия	E_{opt}	45	Дж
Характеристическая энергия деградации	E_d	60	Дж
Температура расплава припоя	T_{base}	230	°C
Коэффициент локального нагрева	α	0,6	°C/Вт
Постоянная времени теплоотвода	τ_T	0,4	с
Предельная температура кристалла	T_{lim}	260	°C

3.2. Кинетика разрушения оксидной плёнки

На рис. 1 представлена зависимость доли остаточной оксидной плёнки от времени ультразвукового воздействия при различных уровнях мощности.

Видно, что при мощности 10 Вт за 2 с оксид удаляется лишь на 80 %, тогда как при 60 Вт полное удаление достигается уже за 0,5 с.

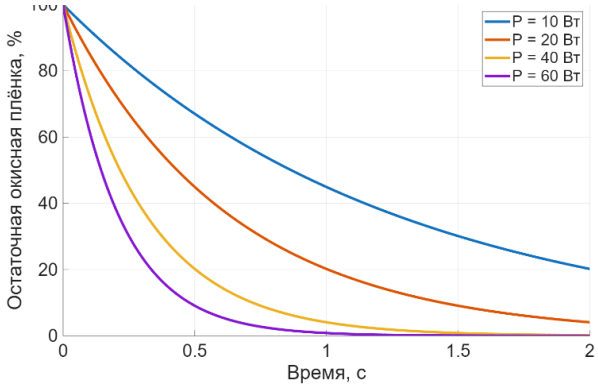


Рисунок 1. Кинетика разрушения оксидной плёнки при различных уровнях ультразвуковой мощности

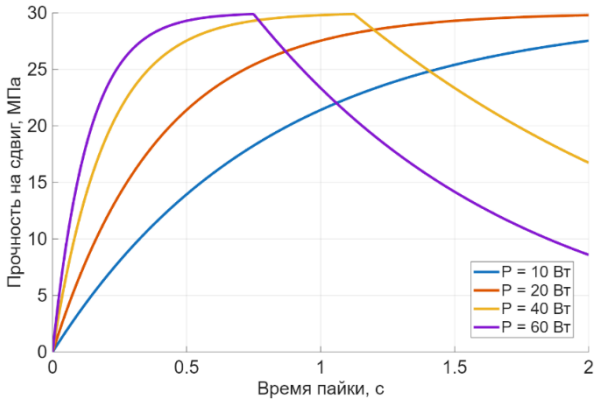


Рисунок 2. Прочность соединения в зависимости от времени пайки при различных уровнях мощности

3.3. Прочность соединения

На рис. 2 показана зависимость прочности соединения на сдвиг от времени пайки при четырёх уровнях мощности. Каждая кривая имеет выраженный максимум, что подтверждает наличие оптимального режима. При мощности 60 Вт максимум достигается при $t \approx 0{,}75$ с, после чего прочность снижается вследствие эрозии металлизации.

3.4. Технологическое окно режимов

На рис. 3 представлена карта прочности в координатах «мощность – время». Пунктирной линией выделена область, в которой прочность составляет не менее 90 % от максимальной. Данная область определяет допустимое технологическое окно для производства.

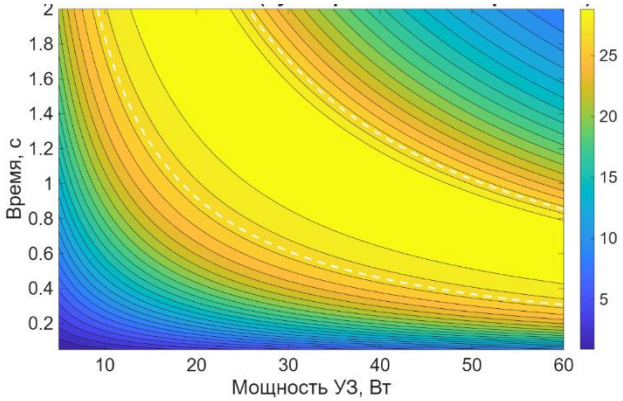


Рисунок 3. Технологическое окно ультразвуковой пайки (пунктир – уровень 90 % от максимальной прочности)

3.5. Локальный перегрев

На рис. 4 показана динамика локальной температуры в зоне пайки. При мощности 60 Вт температура достигает 266 °C, превышая предельно допустимое значение 260 °C, что ограничивает применение высоких мощностей для термочувствительных кристаллов (микроболометров).

3.6. Обсуждение результатов

Полученные результаты моделирования качественно согласуются с экспериментальными данными, приведёнными в [3]: оптимальное время монтажа кристаллов составляет 150–250 мс при мощности порядка 30 Вт. Модель позволяет количественно определить границы технологического окна и обосновать выбор рабочих режимов.

Для микроболометров с тонкоплёночными мембранами рекомендуется работа в нижней части технологического окна ($P = 10 - 20$ Вт, $t = 1{,}5 - 2$ с) с минимальной амплитудой колебаний 1–2 мкм для исключения механического повреждения чувствительного элемента [3]. Для силовых каскодных структур с массивными кристаллами допустима работа при повышенной мощности ($P = 30 - 50$ Вт) с сокращением времени пайки до 0,3–0,8 с.

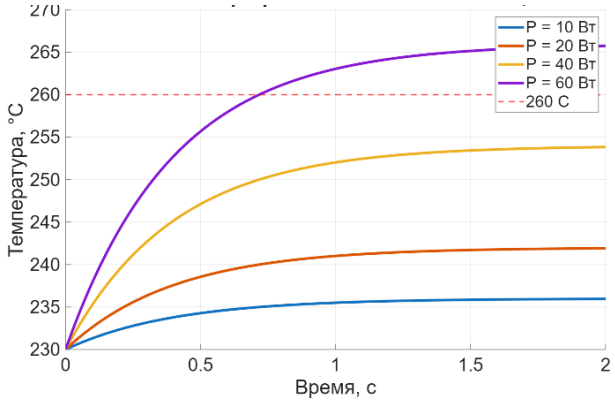


Рисунок 4. Локальная температура в зоне пайки в зависимости от мощности ультразвука

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана математическая модель процесса ультразвуковой пайки кристаллов в корпус, учитывающая кинетику разрушения оксидной плёнки, формирование площади контакта и деградацию соединения при избыточной энергии. Реализованный в MATLAB программный модуль позволяет визуализировать технологическое окно режимов и обосновывать выбор рабочих параметров пайки для различных типов кристаллов.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Технологические особенности монтажа Flip-Chip / В. Л. Ланин [и др.] // Силовая электроника. – 2010. – № 4. – С. 78–82.

[2] Конструктивно-технологические аспекты сборки мощных транзисторов / А. Т. Скойбеда [и др.] // Электронные компоненты. 2005. № 5. С. 48–53.

[3] Петухов, И. Б. Ультразвуковая и вибрационная пайка кристаллов интегральных схем / И. Б. Петухов, В. Л. Ланин // Технологии в электронной промышленности. – 2019. – № 3. – С. 68–71.

[4] Ultrasonic Soldering and Metallization in Electronics / ed. by M. Schwartz. Springer, 2021. 280 p.

[5] Han, L. Bondability window and power input for wire bonding / L. Han, J. Hu // Microelectronics Reliability. 2006. Vol. 46, No 5. P. 795–802.

[6] Wire Bonding: The Ultrasonic Bonding Mechanism / M. Harman // Semiconductor International. 2012. Vol. 35, No 4. P. 22–29.

MODELING AND OPTIMIZATION OF ULTRASONIC DIE BONDING PROCESS PARAMETERS FOR ELECTRONIC PACKAGING

A.E. Vidrytski[1], A.I. Sauko[1], D.S. Liauchuk[1], V.L. Lanin[2]

[1]INTEGRAL JSC - Managing Company of INTEGRAL Holding, Minsk, Republic of Belarus, AVidritskiy@integral.by

[2]Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Abstract: a mathematical model of the ultrasonic die bonding process is presented, enabling prediction of bond strength as a function of ultrasonic power and process duration. The model accounts for oxide film removal kinetics, contact area formation, and bond degradation at excessive energy input. A MATLAB-based software module has been developed for visualization of the process parameter window. Simulation results confirm the existence of an optimal energy input range, which is consistent with experimental data.

Keywords: ultrasonic soldering, die bonding, modeling, process window, bond strength, microelectronics.

УДК 537.311.33

СПЕКТР ТОКА В ТОНКОЙ ПЛЕНКЕ ПОЛУМЕТАЛЛА ВЕЙЛЯ

Рышкевич А.А., Данилюк А.Л.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, ryshcevich01@gmail.com

Аннотация: в линейном приближении в рамках формализма Кубо с привлечением мацубаровских пропагаторов получены частотные зависимости для проводимости и средней плотности тока. Показано, что ток формируется как внутризонными переходами, так и межзонными переходами. На графиках представлен спектр продольного тока в тонкой пленке вейлевского полуметалла с барьерами на границах. В низкочастотной области возникает наиболее сильный отклик, особенно выраженный в мнимой части. При дальнейшем увеличении частоты наблюдается осцилляция и резонансные пики, связанные с межзонными переходами.

Ключевые слова: полуметалл Вейля, спектр, тонкая пленка, проводимость Кубо, мацубаровский пропагатор, размерное квантование, электронный ток.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время исследование полуметаллов Вейля является актуальным вопросом в физике конденсированных сред. В данной работе рассмотрено влияние электрического поля на спектр тока вейлевского полуметалла. Используя микроскопический подход получены частотные зависимости для проводимости и средней плотности тока. Рассмотрен Гамильтониан носителей заряда вблизи вейлевской точки [1].

II. ИСХОДНЫЙ ГАМИЛЬТОНИАН И ФОРМУЛА ДЛЯ ТОКА

Рассматривается ультратонкая плёнка вейлевского полуметалла. Низкоэнергетический гамильтониан в базисе четырёхкомпонентных спиноров, объединяющих две киральности и два спиновых состояния, имеет вид [2]:

$$\widehat{H}(\boldsymbol{k}_{\parallel}, -i\partial_z) = v_F\left(\tau_z\sigma_x k_x + \tau_0\sigma_y k_y\right) + \tau_z\sigma_z\,\Delta(-i\partial_z) + V(z), \tag{1}$$

где v_F – фермиевская скорость, $\tau_{0,x,y,z}$ – матрицы Паули в киральном пространстве (два вейлевских узла), $\tau_0 = \mathbb{1}$, $\sigma_{x,y,z}$ – матрицы Паули в спиновом пространстве, $\Delta(k_z) = M_0 - M_1 k_z^2$ – «массовый» член, обращающийся в нуль в объёмных вейлевских точках $k_z = \pm Q$ (где $Q = \sqrt{M_0/M_1}$), $V(z)$ – профиль потенциала гетероструктуры, включающий интерфейсные барьеры, смещения зон и т. п. В данном случае $V(z)$ - бесконечно высокий прямоугольный потенциал, приводящий к нулевым граничным условиям $\psi(z=0) = \psi(z=d) = 0$, d – толщина пленки.

Задача сводится к нахождению собственных состояний, характеризуемых двумерным волновым вектором в плоскости $\boldsymbol{k}_{\parallel} = (k_x, k_y)$ и зонным индексом n. Собственные состояния гамильтониана:

$$\psi_{n,\boldsymbol{k}_{\parallel}}(\mathbf{r}) = \frac{1}{\sqrt{S}} e^{i\mathbf{k}_{\parallel}\cdot\mathbf{r}_{\parallel}}\,\varphi_{n,\mathbf{k}_{\parallel}}(z), \tag{2}$$

Четырёхкомпонентный спинор, удовлетворяющий стационарному уравнению

$$\widehat{H}(\mathbf{k}_{\parallel}, -i\partial_z)\,\varphi_{n,\boldsymbol{k}_{\parallel}}(z) = E_n(\mathbf{k}_{\parallel})\,\varphi_{n,\mathbf{k}_{\parallel}}(z), \tag{3}$$

с граничными условиями $\varphi_{n,\mathbf{k}_{\parallel}}(0) = \varphi_{n,\mathbf{k}_{\parallel}}(d) = 0$.

Ортонормировка спиноров:

$$\int_0^d \varphi^{\dagger}_{n,k_{\parallel}}(z)\varphi_{m,k_{\parallel}}(z)dz = \delta_{nm},\ \int \psi^{\dagger}_{n,k_{\parallel}}(\mathbf{r})\psi_{m,k'_{\parallel}}(\mathbf{r})d^2\mathbf{r}_{\parallel}dz = \delta_{nm}\delta_{\mathbf{k}_{\parallel},\mathbf{k}'_{\parallel}}. \tag{4}$$

Индекс n нумерует все подзоны, включая объёмные и поверхностные состояния.

Полевые операторы в представлении операторов рождения и уничтожения:

$$\widehat{\Psi}(\mathbf{r}) = \sum_{n,\mathbf{k}_{\parallel}} \psi_{n,\boldsymbol{k}_{\parallel}}(\mathbf{r})\,c_{n,\boldsymbol{k}_{\parallel}},\ \widehat{\Psi}^{\dagger}(\mathbf{r}) = \sum_{n,\boldsymbol{k}_{\parallel}} \psi^{\dagger}_{n,\boldsymbol{k}_{\parallel}}(\mathbf{r})\,c^{\dagger}_{n,\boldsymbol{k}_{\parallel}}, \tag{5}$$

где $c_{n,\mathbf{k}_\parallel}, c^\dagger_{n,\mathbf{k}_\parallel}$ – фермиевские операторы уничтожения и рождения.

Электрический ток в направлении α (в единицах заряда -e) определяется через оператор скорости:

$$\hat{J}_\alpha = -e \int \hat{\Psi}^\dagger(\mathbf{r})\, \hat{v}_\alpha\, \hat{\Psi}(\mathbf{r}) d^2\mathbf{r}_\parallel . \tag{6}$$

Оператор скорости получается дифференцированием гамильтониана по импульсу ($\hbar = 1$).

III. ПЛОТНОСТЬ ТОКА И ПРОВОДИМОСТЬ

В Фурье-представлении по $\mathbf{k}_\parallel$ полный оператор тока принимает вид [3

$$\hat{J}_\alpha = -e \sum_{\mathbf{k}_\parallel} \sum_{n,m} \langle \psi_{n,k_\parallel} \mid \hat{v}_\alpha \mid \psi_{m,k_\parallel} \rangle\, c^\dagger_{n,\mathbf{k}_\parallel} c_{m,\mathbf{k}_\parallel}, \tag{7}$$

где матричный элемент $\hat{v}^\alpha_{nm}(\mathbf{k}_\parallel) \equiv \langle \psi_{n,\mathbf{k}_\parallel} \mid \hat{v}_\alpha \mid \psi_{m,\mathbf{k}_\parallel} \rangle = \int_0^d \varphi^\dagger_{n,\mathbf{k}_\parallel}(z)\, \hat{v}_\alpha\, \varphi_{m,\mathbf{k}_\parallel}(z) dz$.

Средний ток в линейном приближении в представлении запаздывающего коррелятора Кубо [3]:

$$\langle J_\alpha(\omega) \rangle = \sigma_{\alpha\beta}(\omega) E_\beta(\omega),\ \sigma_{\alpha\beta}(\omega) = \frac{1}{i\omega}\left[\Pi^R_{\alpha\beta}(\omega) - \Pi^R_{\alpha\beta}(0)\right], \tag{8}$$

где $\Pi^R_{\alpha\beta}(\omega) = -i \int_0^\infty e^{i\omega t} \langle \left[J_\alpha{}'(t) J_\beta(0) \right] \rangle dt$.

Для вычисления Π^R переходим к мнимым временам и мацубаровским функциям Грина. В формализме мнимого времени τ ($0 \le \tau \le \beta$, $\beta = 1/(k_B T)$) определяется одночастичный пропагатор и его

Фурье-образ по мнимым фермионным частотам $\omega_n = (2n+1)\pi/\beta$ и координатам. Далее определится температурный коррелятор токов на единицу площади в мнимом времени и его преобразование по бозонным частотам $\nu_m = 2\pi m/\beta$. Используя вид операторов тока, получаем:

$$\Pi_{\alpha\beta}(i\nu_m) = -\frac{e^2}{S} \sum_{\mathbf{k}_\parallel, \mathbf{k}'_\parallel} \sum_{n,m,p,q} \hat{v}^\alpha_{nm} \hat{v}^\beta_{pq} \int_0^\beta e^{i\nu_m \tau} \left\langle \hat{T}_\tau c^\dagger_{n,\mathbf{k}_\parallel}(\tau) c_{m,\mathbf{k}_\parallel}(\tau) c^\dagger_{p,\mathbf{k}'_\parallel}(0) c_{q,\mathbf{k}'_\parallel}(0) \right\rangle d\tau . \tag{9}$$

Вводя одночастичные пропагаторы $G_{ab}(\tau)$, $G^\dagger_{ab}(\tau)$, получаем [4]

$$\Pi_{\alpha\beta}(i\nu_m) = -\frac{e^2}{S} \sum_{\mathbf{k}_\parallel} \sum_{n,m} \hat{v}^\alpha_{nm} \hat{v}^\beta_{mn} \int_0^\beta e^{i\nu_m \tau} G_n(-\tau) G_m(\tau) d\tau . \tag{10}$$

Выражая мацубаровские пропагаторы в частотном представлении получим коррелятор в виде

$$\Pi_{\alpha\beta}(i\nu_m) = \frac{e^2}{S} \sum_{\mathbf{k}_\parallel} \sum_{n,m} \hat{v}^\alpha_{nm} \hat{v}^\beta_{mn} \frac{1}{\beta} \sum_{i\omega_n} \frac{1}{i\omega_n - E_n} \frac{1}{i\omega_n + i\nu_m - E_m}. \tag{11}$$

Преобразуя (11) и вводя функции Ферми-Дирака $f(E) = \frac{1}{(e^{\beta E}+1)'}$ получим коррелятор в виде

$$\Pi_{\alpha\beta}(i\nu_m) = -\frac{e^2}{S} \sum_{\mathbf{k}_\parallel} \sum_{n,m} \hat{v}^\alpha_{nm} \hat{v}^\beta_{mn} \frac{f(E_m) - f(E_n)}{i\nu_m + E_m - E_n}. \tag{12}$$

Чтобы получить запаздывающий коррелятор $\Pi^R_{\alpha\beta}(\omega)$, делаем аналитическое продолжение с дискретных мнимых частот на вещественную ось $i\nu_m \to \omega + i\delta$, $\delta \to 0^+$. В итоге получим

$$\Pi_{\alpha\beta}(\omega) = -\frac{e^2}{S} \sum_{\mathbf{k}_\parallel} \sum_{n,m} \hat{v}^\alpha_{nm} \hat{v}^\beta_{mn} \frac{f(E_m) - f(E_n)}{\omega + E_m - E_n + i\delta}. \tag{13}$$

И соответственно явный вид выражения для проводимости

$$\sigma_{\alpha\beta}(\omega) = -\frac{ie^2}{S} \sum_{\mathbf{k}_\parallel} \sum_{n,m} \frac{f(E_n) - f(E_m)}{E_n - E_m} \frac{\hat{v}^\alpha_{nm} \hat{v}^\beta_{mn}}{\omega + E_m - E_n + i\delta}. \tag{14}$$

Это выражение объединяет внутризонные ($n = m$) и межзонные ($n \neq m$) переходы. Средняя плотность тока (ток на единицу площади) в направлении α под действием поля $E_\beta(\omega)$ есть

$$\langle j_\alpha(\omega)\rangle = \sigma_{\alpha\beta}(\omega)E_\beta(\omega). \quad (15)$$

Подставляя $\sigma_{\alpha\beta}$, приходим к окончательной формуле для тока

$$\langle j_\alpha(\omega)\rangle = -\frac{ie^2}{S}\sum_{\mathbf{k}_\parallel}\sum_{n,m}\frac{f(E_n)-f(E_m)}{E_n-E_m}\frac{\langle\psi_{n,\mathbf{k}_\parallel}|\hat{v}_\alpha|\psi_{m,\mathbf{k}_\parallel}\rangle\langle\psi_{m,\mathbf{k}_\parallel}|\hat{v}_\beta|\psi_{n,\mathbf{k}_\parallel}\rangle}{\omega+E_m-E_n+i\delta}. \quad (16)$$

Результаты расчета спектра тока в произвольных единицах приведены на рис.1.

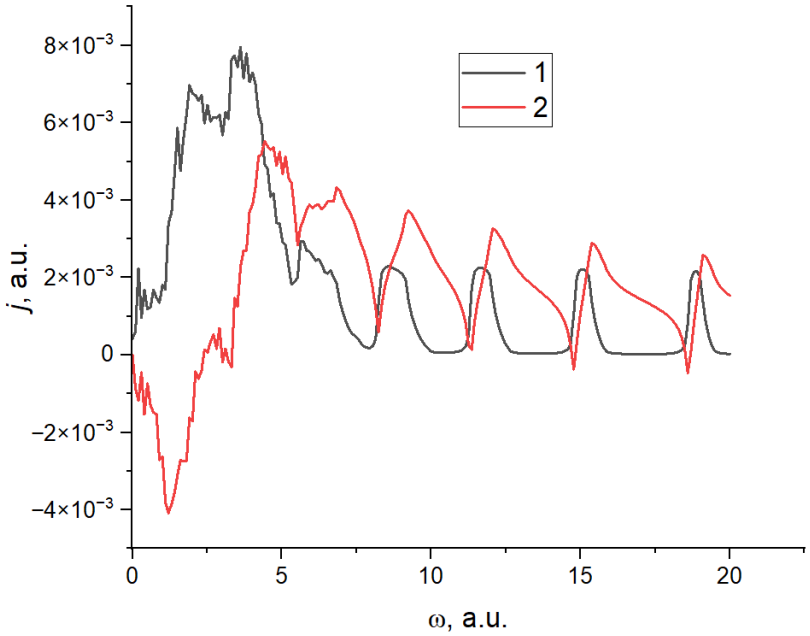


Рисунок 1. Спектр тока в тонкой пленке полуметалла Вейля с барьерами на границах (параметр δ = 0,05): действительная часть (кривая 1), мнимая часть (кривая 2)

В низкочастотной области ($\omega \lesssim 6$) формируется наиболее сильный отклик во всём спектре. Мнимая часть тока уходит в отрицательную область, достигая минимума $\approx -4\cdot10^{-3}$ при $\omega \approx 2$, тогда как действительная часть мала вплоть до $\omega \approx 3$, после чего резко возрастает до положительного максимума $\approx 8\cdot10^{-3}$ при $\omega \approx 4{,}5$. Такое соотношение компонент – сначала экстремум мнимой части, затем максимум действительной – характерно для резонансного отклика осциллятора вблизи собственной частоты перехода.

Природа низкочастотного резонанса связана с переходами между нижними подзонами, среди которых ключевую роль играют состояния, локализованные у границ плёнки. В отличие от объёмных подзон, размазанных по толщине и образующих эквидистантный набор уровней, поверхностные состояния прижаты к $z = 0$ или $z = d$ и отщеплены от основной серии. Зазор между нижним поверхностным уровнем и ближайшей объёмной подзоной оказывается меньше типичного межподзонного расщепления, что и даёт низкочастотный пик, отделённый от гребёнки резонансов при $\omega \gtrsim 6$. Большие матричные элементы оператора скорости между поверхностным и объёмным состояниями (за счёт сильного перекрытия вблизи границы) делают амплитуду этого перехода наибольшей в спектре; дополнительный вклад даёт внутризонное движение носителей у поверхности.

Область $6 \lesssim \omega \lesssim 15$ занята квазипериодической осцилляцией, отражающей вклад размерно-квантованных объёмных подзон: резонансы соответствуют переходам с примерно равными разностями энергий, что типично для квантовой ямы с барьерами. Осцилляции Im(j) связаны с межподзонными переходами с разными правилами отбора, осцилляции Re(j) – с диссипативным поглощением. Чередование знаков мнимой части обусловлено знаками матричных элементов оператора скорости между соответствующими состояниями. С ростом частоты амплитуда осцилляций падает, поскольку система не успевает перестраиваться.

Получены более точные результаты моделирования (параметр δ = 0,01). Они повторяют общие характерные особенности результатов при δ = 0,05 (рис. 1), но отличаются более богатой и изрезанной структурой спектра, что говорит о большем числе размерно-квантованных подзон и, соответственно, межподзонных переходов.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе использована модель ультратонкой плёнки вейлевского полуметалла, описываемая четырёхкомпонентным низкоэнергетическим гамильтонианом для двух киральностей и двух спиновых состояний. Массовый член обращается в нуль в объёмных вейлевских точках. Границы плёнки моделируются бесконечно высокими барьерами, что даёт нулевые граничные условия для волновой функции. Найдены собственные состояния с двумерным волновым вектором $\mathbf{k}_{\parallel}$ и индексом подзоны n, включающим объёмные и поверхностные состояния. Введены полевые операторы и оператор тока через оператор скорости, полученный дифференцированием гамильтониана по импульсу.

Для линейного отклика применён формализм Кубо. Использованы мацубаровские функции Грина, теорема Вика и аналитическое продолжение с мнимых частот на вещественную ось. Выведены выражения для коррелятора токов, проводимости $\sigma_{\alpha\beta}$ и средней плотности тока $\langle j_{\alpha} \rangle$. Показано, что токовый отклик включает как внутризонные переходы ($n = m$), так и межзонные переходы ($n \neq m$). Окончательная формула для тока содержит сумму по подзонам и волновым векторам, разность функций Ферми – Дирака и матричные элементы оператора скорости.

В тонкой плёнке вейлевского полуметалла спектр тока сильно перестраивается из-за размерного квантования. Вместо непрерывного спектра объёмного кристалла появляется набор подзон, а токовый отклик становится резонансным. Пики соответствуют переходам между этими подзонами. Низкочастотный отклик может быть связан с переходами между нижними подзонами или с поверхностными состояниями. Спектр чувствителен к толщине плёнки, профилю потенциала, высоте. Уточненный расчет показал, что при определённых параметрах спектр может становиться особенно богатым и изрезанным. Это отражает вклад большого числа межподзонных переходов и делает такие системы перспективными для управления электронным транспортом и оптическим откликом с помощью геометрии и граничных условий.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Gorbar, E. V., Miransky, V. A., Shovkovy, I. A., Sukhachov, P. O. Electronic Properties of Dirac and Weyl Semimetals. – World Scientific Publishing Co., 2021.

[2] Хомицкий, Д. В. Элементы теории топологических изоляторов : учебное пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский гос. ун-т им. Н. И. Лобачевского, 2025. – 142 с.

[3] Nazarov, Y. V., Blanter, Y. M. Quantum Transport: Introduction to Nanoscience. – Cambridge University Press, 2009.

[4] Datta, S. Quantum Transport: Atom to Transistor. — Cambridge University Press, 2005.

CURRENT SPECTRUM IN A THIN FILM OF A WEYL SEMIMETAL

A.A. Ryshkevich, A.L. Danilyuk

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
ryshcevich01@gmail.com

Abstract: in the linear approximation within the Kubo formalism using Matsubara propagators, frequency dependences are obtained for the conductivity and average current density. It is shown that the current is formed by both intraband and interband transitions. The graphs present the spectrum of longitudinal current in a thin film of a Weyl semimetal with barriers at the boundaries. In the low-frequency region, the strongest response arises, especially pronounced in the imaginary part. With a further increase in frequency, oscillations and resonant peaks associated with interband transitions are observed.

Keywords: Weyl semimetal, spectrum, thin film, Kubo conductivity, Matsubara propagator, size quantization, electronic current.

УДК 621.382

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АНАЛИТИЧЕСКИХ И СТАТИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ, РЕАЛИЗОВАННЫХ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Курленко А.Д.[1], Громыко В.А.[1], Ловшенко И.Ю.[2], Биран С.А.[2]

[1]Учреждение образования «Национальный детский технопарк», Минск, Республика Беларусь

[2]Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, lovshenko@bsuir.by

Аннотация: проведено сравнение аналитического метода и метода Монте-Карло при моделировании ионной имплантации в монокристаллический кремний в диапазоне энергий 20–200 кэВ при угле наклона пучка 7 °. Установлено, что аналитический метод обеспечивает физически корректные зависимости глубины залегания *p-n* перехода и удельного поверхностного сопротивления от энергии. Метод Монте-Карло при 10^5 ионов воспроизводит аналитический результат с малым отклонением, при 10^3 ионов результаты содержат значительный статистический разброс и не пригодны для точных расчетов.

Ключевые слова: ионная имплантация, метод Монте-Карло, аналитические модели, САПР микроэлектроники.

I. ВВЕДЕНИЕ

Ионная имплантация является ключевым этапом формирования легированных областей полупроводниковых приборов, а корректность ее моделирования на стадии проектирования определяет электрофизические характеристики формируемых структур [1]. В системах автоматизированного проектирования микроэлектроники реализованы два принципиально различных подхода: аналитический метод, основанный на аппроксимации профиля распределения примеси функцией Пирсона IV типа, и статистический метод Монте-Карло (МК) в приближении бинарных столкновений [2]. Каждый подход обладает определенными ограничениями по диапазону энергий, типу ионов и условиям проведения процесса, однако систематическое сопоставление результатов, получаемых указанными методами в единых условиях, ограничено представлено в литературе. Цель работы – сравнительная оценка аналитического метода и метода Монте-Карло при моделировании ионной имплантации.

II. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование проводилось в среде технологического моделирования, реализующей как аналитический метод, так и метод МК. Исходная структура – монокристаллическая подложка Si (100): *n*-типа (легированная фосфором, удельное сопротивление 4,5 Ом·см) при имплантации бора и *p*-типа (легированная бором, удельное сопротивление 10 Ом·см) при имплантации фосфора и мышьяка с оксидной маской толщиной 1 мкм и окном для проведения имплантации. Доза имплантации фиксировалась на уровне 10^{14} см$^{-2}$, угол наклона пучка ионов составлял 7 ° для подавления эффекта каналирования. Энергия варьировалась от 20 до 200 кэВ с шагом 20 кэВ. Исследовано три типа ионов: B^+, P^+ и As^+. Число моделируемых ионов в методе МК составило 10^3, 10^4 и 10^5. Определяемые характеристики – глубина залегания *p-n* перехода и удельное поверхностное сопротивление. Сравнение методов проводилось путем сопоставления зависимостей указанных характеристик от энергии и дозы имплантации, а также угла наклона пучка ионов, полученных аналитическим методом и методом МК при последовательном увеличении числа моделируемых ионов. Результаты представлены на примере имплантации фосфора в подложку *p*-типа. На рисунке 1 представлена зависимость глубины залегания *p-n* перехода от энергии имплантации. Аналитический метод обеспечивает монотонно возрастающую линейную зависимость с ростом глубины от 0,44 мкм при 20 кэВ до 0,99 мкм при 200 кэВ. Аналогичный монотонный характер зависимости глубины залегания от энергии наблюдается для мышьяка, однако с существенно меньшим наклоном, что обусловлено преобладанием ядерного торможения для тяжелых ионов. Для бора аналитический метод демонстрирует немонотонное поведение с локальным провалом в области 100–150 кэВ, обусловленное ограниченностью табличных данных.

При 10^3 моделируемых ионов наблюдается значительный разброс точек относительно линии тренда, зависимость приобретает ступенчатый характер. При 10^4 ионов основная масса точек концентрируется вблизи общего тренда, однако единичные провалы сохраняются. При 10^5 ионов зависимость становится практически монотонной с единичными отклонениями, а в большинстве случаев расхождение с результатами для аналитического метода не превышает 10 % относительно последних (здесь и далее). Аналогичные результаты наблюдаются для удельного поверхностного сопротивления: аналитический метод обеспечивает гладкий квадратичный спад сопротивления от 640 Ом/кв при 20 кэВ до 370 Ом/кв при 200 кэВ; метод МК при

10^5 ионов практически воспроизводит данную зависимость с отклонением не более 5 %, тогда как при 10^3 ионов разброс составляет порядка ±100 Ом/кв, что делает результат непригодным для точных расчетов.

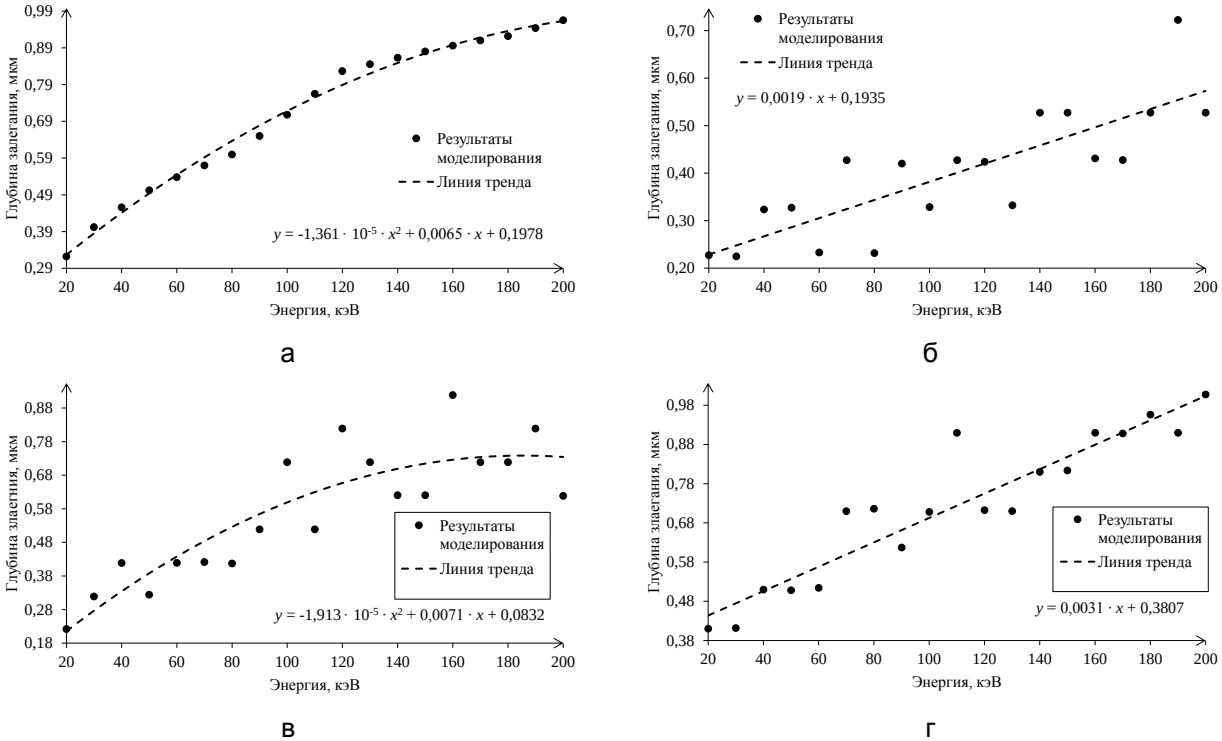


Рисунок 1. Зависимость глубины залегания фосфора от энергии, полученная аналитическим методом (а), методом Монте-Карло при 1000 ионов (б), при 10 000 ионов (в) и при 100 000 ионов (г)

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате сравнительного анализа установлено, что аналитический метод обеспечивает монотонные физически корректные зависимости глубины залегания и удельного поверхностного сопротивления от энергии в диапазоне 20–200 кэВ при угле наклона 7 ° и является предпочтительным при стандартных условиях имплантации вследствие меньших вычислительных затрат. Метод Монте-Карло при 10^5 ионов в таких же условиях воспроизводит аналитический результат с отклонением не более 10 %. Минимально необходимое число моделируемых ионов для получения количественно достоверных результатов также составляет 10^5; при 10^3 ионов разброс значений делает результат непригодным для точных расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Effects of Ion Channeling and Co-Implants on Ion Ranges and Damage in Si: Studies With PL, SRP, SIMS and MC Models / M. I. Current [et al.] // IEEE Journal of the Electron Devices Society. – 2024. – Vol. 12. – P. 399–406.

[2] Accurate and efficient 3D analytic ion implantation model based on Legendre polynomials / A. Terterian [et al.] // Materials Science in Semiconductor Processing. – 2024. – Vol. 169. – P. 107933.

COMPARATIVE ANALYSIS OF ANALYTICAL AND STATISTICAL ION IMPLANTATION MODELS IMPLEMENTED IN COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEMS

A. Kurlenko[1], V. Hramyka[1], I. Lovshenko[2], S. Biran[2]

[1]National Children's Technopark, Minsk, Republic of Belarus, lovshenko@bsuir.by

[2]Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Abstract: a comparative study of analytical and Monte Carlo methods for modeling ion implantation into single-crystal silicon was conducted in the energy range of 20–200 keV at a beam tilt angle of 7 °. It is established that the analytical method provides physically correct dependencies of the p-n junction depth and sheet resistance on energy. The Monte Carlo method using 10^5 ions reproduces the analytical results with minor deviations, whereas at 10^3 ions, the results exhibit significant statistical scatter and are unsuitable for precise calculations.

Keywords: ion implantation, Monte Carlo method, analytical models, microelectronics CAD.

UDC 621.3.049.77: 621.396.62

DESIGN OF 2.4–2.5 GHZ LOW-NOISE AMPLIFIER WITH DIGITAL GAIN CONTROL IN 28 NM FD-SOI TECHNOLOGY

I.G. Chertoritskii[1], S.E. Bukhtoyarov[2]

[1]Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus, chort.ivan@gmail.com

[2]Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

Abstract: this paper presents a 2.4-2.5 GHz Low Noise Amplifier (LNA) with Digital Gain Control (DGC) implemented in 28-nm FD-SOI CMOS technology. The LNA achieves NF of 1.7 dB at maximum gain. At minimum gain it provides IIP3 of −0.02 dBm, and P1dB of −2.8 dBm. A 3-bit DGC varies the power gain from 7.5 dB to 17 dB, while LNA consumes 15.3 mW at 1.8 V supply across all gain settings. At maximum gain S11/S22/S12 are −20.3/−27.9/−26.5 dB at 2.45 GHz. The design achieves high gain, low NF, high linearity and a 9.5 dB gain tuning range.

Keywords: Low Noise Amplifier (LNA); Digital Gain Control; CMOS; FD-SOI; ISM; WLAN.

I. INTRODUCTION

The 2.4 GHz ISM band is a key frequency range for modern wireless communications, supporting Wi‑Fi, Bluetooth, ZigBee, and a wide range of IoT devices. The Low Noise Amplifier (LNA) is the first active stage in a receiver, and it is responsible for providing high gain, low noise figure (NF), good linearity, and stable impedance matching, under tight power constraints [1]. A weak signal requires high gain and low NF to maintain sensitivity, whereas a strong signal may saturate the receiver, causing distortions. This trade‑off motivates the use of adaptive gain control. A digitally controlled LNA can adjust its gain based on the input power, improving linearity when needed without compromising noise performance under weak signal conditions [2]. The design uses a cascode topology with LC load and operates from a 1.8 V supply.

II. CIRCUIT DESIGN

An inductive load is chosen for its low DC voltage drop and high gain. However, classical common-source LNA design often suffers from the Miller effect, caused by the parasitic gate-drain capacitance, which becomes significant at high frequencies. In combination with the inductor, this parasitic capacitance can introduce negative resistance [2], degrading input matching and overall stability (S-parameters). A cascode transistor suppresses this effect and increases the reverse isolation [3]. To achieve high gain with low noise, a cascode LNA with an LC resonant load is implemented. The proposed design of the LNA is presented in Figure 1.

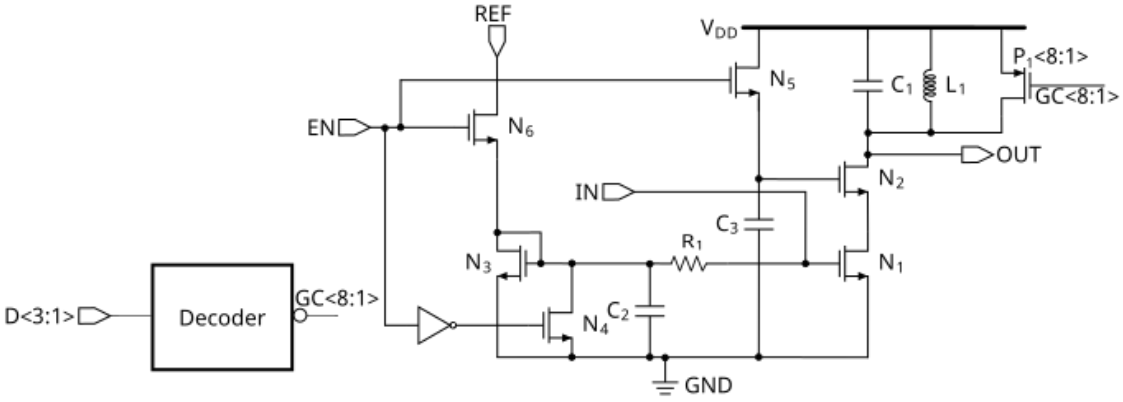


Figure 1. Proposed design of CS Cascode LNA with LC load

The WLAN application of the LNA determines the necessity of handling a wide range of input signals: from the thermal noise floor to levels near the supply voltage. To prevent saturation without sacrificing sensitivity, the LNA gain must be adjustable. In the following design, the gain switching is realized by a 3-bit Digital Gain Control system (Decoder), which configures the load impedance by enabling or disabling parallel p-channel MOSFET branches connected to the LC tank. When all branches are disabled, LNA operates with the highest load and provides the highest gain. Enabling additional branches lowers the tank impedance, reducing the gain and improving linearity. This feature is essential when the input power varies widely, requiring the system to adjust gain and linearity dynamically.

The proposed LNA is implemented in a 28‑nm FD‑SOI (Fully Depleted Silicon‑On‑Insulator) CMOS process. In FD‑SOI, the fully depleted floating body further improves transconductance (gm) and reduces parasitic capacitances, which directly contribute to a lower noise figure and higher gain compared to bulk CMOS technologies. A direct comparison of LNAs designed in 40 nm bulk CMOS and 28 nm FD‑SOI under the same methodology showed that the FD‑SOI implementation achieves comparable noise figure while consuming 20% less power [4].

III. SIMULATIOM RESULTS

The RF core uses FD‑SOI devices, while the gain‑control switches and digital decoder are implemented in bulk CMOS. Figure 2 presents the simulated S-parameters (S11, S22, S12, S21) and NF of the proposed LNA at maximum gain setting.

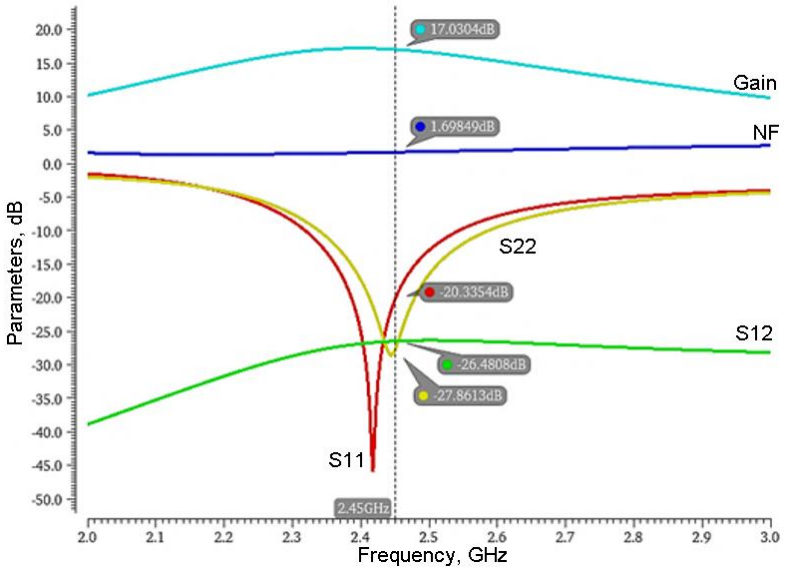


Figure 2. Simulated S-parameters and noise figure at maximum gain

According to the results the LNA achieves gain of 17 dB, NF of 1.7 dB, and S-parameters S11 of −20.3 dB, S22 of −27.9 dB, and S12 of −26.5 dB at 2.45 GHz. At the band edges (2.4 GHz and 2.5 GHz), the gain is 17.2 dB and 16.6 dB, while the NF is 1.6 dB and 1.79 dB, respectively. The input and output return losses remain stable across the whole band from 2.4 and 2.5 GHz, with S11 of −25 dB and −12.9 dB, S22 of −17.3 dB and −16.5 dB, and S12 of −26.9 dB and −26.4 dB respectively.

Table 1 summarizes the LNA performance across all gain states (gain code 0 means minimum gain and code 7 maximum gain).

Table 1. LNA parameters vs. Gain settings at 2.45 GHz

Gval	Gain (dB)	NF (dB)	S11 (dB)	S22 (dB)	S12 (dB)	IIP3 (dBm)
0	7.5	1.91	−15.8	−3	−34.8	−0.02
1	8	1.89	−16.3	−3.4	−34.4	−0.9
2	8.8	1.87	−16.9	−3.9	−33.7	−2
3	9.7	1.85	−17.8	−4.7	−32.9	−3.3
4	10.9	1.82	−19.1	−5.9	−31.9	−5
5	12.4	1.75	−21.1	−7.9	−30.6	−7
6	14.3	1.74	−23.6	−12.2	−28.9	−8.9
7	17	1.7	−20.3	−27.8	−26.5	−10.1

The gain varies from 7.5 dB to 17 dB, providing a tuning range of 9.5 dB. S-parameters improve with gain increasing due to better impedance matching. The NF varies from 1.7 dB to 1.91 dB across all gain settings,

showing little dependence on gain. IIP3 improves to −0.02 dBm at minimum gain, compared to −10.1 dBm at maximum gain. The P1dB parameter is −2.8 dBm at minimum gain and −16 dBm at maximum gain. The bias current of 8.5 mA and power consumption of 15.3 mW remain constant in all gain settings under nominal conditions.

The stability parameters K and B1 are analyzed at maximum and minimum gains in the frequency range 0–5 GHz and are presented in Figure 3. According to the graph, the LNA remains stable in the entire frequency range from 0 to 5 GHz.

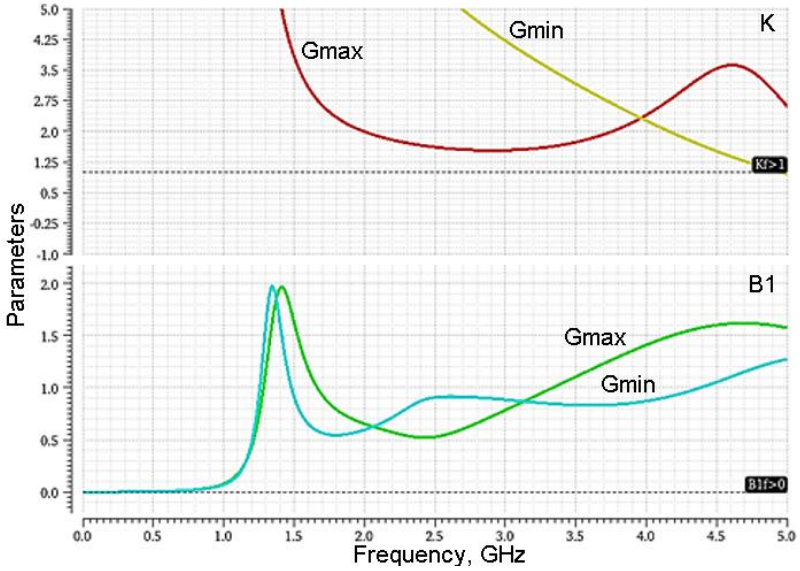


Figure 3. Stability parameters of Low-Noise Amplifier

Although Kf < 1 above 5 GHz suggests a region of conditional stability, this does not lead to oscillations in practice. The onset of oscillation requires a loop gain of at least unity, whereas at these high frequencies the LNA's S21 is negative. The Figure 3 shows that the LNA is stable across the entire frequency range where its forward gain is positive (up to 5 GHz). Above 5 GHz, although Kf < 1, the gain becomes negative, making oscillations impossible.

IV. COMPARISON

The comparison LNAs at central frequency 2.4 GHz is presented in Table 2.

Table 2. Comparison of state-of-the-art LNA performances

Ref.	This work		[5] 2021		[6] 2024		[7] 2022		[8] 2016		[9] 2024
	G_{max}	G_{min}	G_{max}	G_{min}	G_{max}	G_{min}	G_{max}	G_{min}	G_{max}	G_{min}	
Tech. (nm)	28		28		65		65		130		22
Band width [GHz]	2.4–2.5		2–5		2.4		1.8–2.7		2.4		2.4/5/10
Gain (dB)	17	7.5	22.9	16.8	28.2	17.1	20.5	−11	10.1	4.6	16.9
NF (dB)	1.7	1.91	3.6	6.6	2.56	5.18	1.15	14	2.5	4.5	2.8
S11 (dB)	−20	−16	-		-		−10		−30		-
S22 (dB)	−28	−3	-		-		-		−50		-
S12 (dB)	−27	−35	-		-		-		-		-
IIP3 (dBm)	−10	0.02	−17	−16	−15	−9.9	−11	8.6	−8.1	−9.5	−6.5

P1dB (dBm)	−16	−2.8	-		-		-		-	-
Pdc (mW)	15.3		2	0.35	0.56	0.07	16.8	1.33	0.64	13.2
AGC	3-bit Digital		Analog		Digital		Digital		Digital	-
FoM	0.67		1.43		46.5		1.85		3.18	0.92

In case of variable-gain LNAs, the parameters in maximum and minimum gain modes are proposed. In the technical specification, the parameters are mentioned for maximum and minimum gain modes or just for the maximum mode. The comparison includes projects: 28 nm wideband LNA analog current tunning (back-gate) [5], fixed-frequency 2.4 GHz LNA with digital-controlled gain [6], narrowband LNA with digital regulation [7], 130 nm fixed-frequency 2.4 GHz LNA with digital AGC [8] and fixed-gain wideband LNA with the smallest 22 nm technology [9].

The figure of merit (FoM) is calculated according to the following formula, which is commonly used for LNA performance evaluation [1]:

$$FoM = \frac{Gain[\text{linear}] \times IIP3[\text{mW}]}{(NF-1)[\text{linear}] \times P_{DC}[\text{mW}]}. \quad (1)$$

The proposed LNA achieves a competitive gain of 17 dB and NF of 1.7 dB at maximum gain. The S-parameters (S11 = −20.3 dB, S22 = −27.8 dB, and S12 = −26.5 dB) meet the technical specifications and demonstrate stable impedance matching in maximum-gain mode over the entire operating band (Figure 2). The minimum-gain IIP3 of −0.02 dBm is the highest among the compared LNA designs.

The FoM of the proposed LNA (0.67) is lower than of some prior works, mostly due to high power consumption (15.3 mW). However, this design demonstrates the highest linearity in minimum gain mode (IIP3 of −0.02 dBm and P1dB of −2.8 dBm). A 3-bit digital gain-control system provides a 9.5 dB gain range and a constant bias current of 8.5 mA.

VI. CONCLUSOINS

A 2.4–2.5 GHz Low Noise Amplifier with 3-bit digital gain control has been designed and simulated in a 28-nm FD-SOI CMOS technology. The IIP3 improves from −10.1 dBm at maximum gain to –0.02 dBm at minimum gain, demonstrating the effectiveness of gain control under varying input signals.

The LNA's S-parameters (S11 = −20.3 dB and S22 = −27.8 dB and S12 = −26.5 dB at 2.45 GHz) represent the stable impedance matching. At minimum gain, input matching remains stable S11 = −15.8 dB. The decrease of S22 to −3.04 dB due to load switching is acceptable, because in the receiver the LNA follows the active mixer with high input impedance.

The analysis of B1 and K-factors shows the unconditional stability of the LNA across the frequency range 0–5 GHz. The out-of-band instability (above 5 GHz) doesn't affect the LNA performance, because of the negative gain.

Compared to state-of-the-art 2.4 GHz LNAs, the proposed design offers a low noise figure, high gain, the highest linearity, wide gain tuning range, and constant current biasing in all gain modes. The proposed LNA meets the WLAN requirements for high linearity and wide gain tuning range.

REFERENCES

[1] Razavi, B. RF Microelectronics / B. Razavi // Upper Saddle River : Prentice Hall. 2011. 936 p.

[2] Das, T. Practical Considerations for Low Noise Amplifier Design / White Paper RFLNAWP // T. Das; Freescale Semiconductor. Inc. 2013.

[3] Prameela, B. Design of Low Noise Amplifier for IEEE standard 802.11b using Cascode and Modified Cascode Techniques / B. Prameela, A. E. Daniel // Procedia Technology. 2016. Vol. 25. P. 443–449.

[4] Bjorsvik, E. R. Design of Energy Efficient Low Noise Amplifiers in 40 nm bulk CMOS and 28 nm FD-SOI for Intravascular Ultrasound Imaging / E. R. Bjorsvik – Master's thesis // Norwegian University of Science and Technology (NTNU). 2014.

[5] Taris, T. Inductorless Multi-Mode RF-CMOS Low Noise Amplifier Dedicated to Ultra Low Power Applications / Thierry Taris [et. al] // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 83431-83440.

[6] Liu, M. A Digitally Reconfigurable Low-Noise Amplifier with Robust Input Impedance for Machine Learning-Based Receiver Optimizations / M. Liu [et. al] // 2024 IEEE 67th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS). Springfield, MA, USA. P. 392-396

[7] Asl, S.A.H. A 1.8–2.7 GHz Triple-Band Low Noise Amplifier with 31.5 dB Dynamic Range of Power Gain and Adaptive Power Consumption for LTE Application / S. Ali Hosseini Asl [et. al] // Sensors 2022. No. 11: 4039. P. 1-13.

[8] González J. R. Energy-Aware Low-Power CMOS LNA with Process-Variations Management / Jorge Luis González [et. al] // Active and Passive Electronic Components. 2016. P. 1-10.

[9] Drakakis S. A Design Methodology for RF/mmWave LNAs in 22 nm FD-SOI with Cross-Coupling-Aware Nested Inductors and On-Chip Baluns / Stavros Drakakis [et al.] // Electronics. 2026. Volume 15. No: 25. P. 1-30.

СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАЛОШУМЯЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ ДЛЯ ДИАПАЗОНА 2,4–2,5 ГГЦ С ЦИФРОВОЙ РЕГУЛИРОВКОЙ УСИЛЕНИЯ ПО 28 НМ КНИ ТЕХНОЛОГИИ

Черторицкий И.Г.[1], Бухтояров С.Е.[2]

[1]Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, chort.ivan@gmail.com

[2]Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Аннотация: представлено схемотехническое решение малошумящего усилителя (МШУ), работающего в диапазоне 2,4–2,5 ГГц, с цифровой регулировкой усиления, разработанное по 28 нм КнИ технологии. Уровень шума (NF) достигает 1,7 дБ в режиме максимального усиления. 3-битная схема цифровой регулировки усиления обеспечивает изменение коэффициента усиления в диапазоне от 7,5 дБ до 17 дБ при потреблении МШУ 15,3 мВт при напряжении питания 1,8 В для всех режимов усиления. При минимальном усилении параметры линейности IIP3 и P1dB достигают значений −0,02 дБм и −2,8 дБм соответственно. S-параметры S11/S22/S12 принимают значения −20.3/−27.9/−26.5 дБ на частоте 2,45 ГГц при максимальном усилении. Спроектированное решение обеспечивает высокий коэффициент усиления, низкий уровень шума, высокую линейность и диапазон регулировки усиления 9,5 дБ.

Ключевые слова: малошумящий усилитель (МШУ); цифровая регулировка усиления; КМОП; КнИ; ISM; WLAN.

УДК 669.3.017

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МЕДНЫХ СПЛАВОВ

Козик Е.С., Хрущов М.М., Бакшаев И.С., Горшков Н.М., Васильев П.А., Рожнов Н.С., Чибиров Т.Д.

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация,
MihailKhrushchov@yandex.ru

Аннотация: работа посвящена оптимизации режимов термической обработки хромоциркониевой бронзы БрХЦр. Рассмотрено влияние температуры закалки и старения на фазовый состав, микроструктуру и свойства сплавов системы Cu-Cr-Zr. На основе литературных данных и термодинамического моделирования предложены границы оптимальных режимов: закалка 950–1000 °C, старение 450–500 °C. Установлено, что отклонение от режима приводит либо к неполному распаду пересыщенного твёрдого раствора, либо к коагуляции выделению и росту зерна. Работа может служить основой для модели прогнозирования свойств БрХЦр после термообработки.

Ключевые слова: БрХЦр, Cu-Cr-Zr, закалка, старение, дисперсионное твердение, электропроводность, микротвёрдость.

I. ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы обусловлена тем, что хромоциркониевая бронза (C18150) находит применение в электротехнических компонентах, включая элементы, проектируемые и изготавливаемые в рамках современных EDA-ориентированных производственных цепочек. Моделирование термической обработки таких материалов представляет интерес для TCAD-подхода (Technology Computer-Aided Design, компьютерное проектирование в электронике) – направления EDA (Electronic Design Automation, автоматизация проектирования электронных приборов и устройств), связанного с моделированием технологических процессов.

Хромоциркониевая бронза БрХЦр – основной материал для ответственных деталей ракетных двигателей, кристаллизаторов непрерывного литья стали и электродов контактной сварки. Уникальное сочетание прочности и электропроводности достигается дисперсионным твердением: закалка фиксирует пересыщенный твёрдый раствор Cr и Zr в меди, а старение вызывает его распад с выделением мелкодисперсных частиц. БрХЦр относится к группе бронз, которые, в отличие от латуней, обладают высокими механическими и антифрикционными свойствами, хорошо сопротивляются коррозии и имеют высокую электропроводность [6]. Легирование меди хромом (до 0,5 %) повышает прочность, пластичность и электропроводность; введение циркония способствует измельчению структуры [6].

Режимы термообработки в рассмотренном материале различаются: в [1] оптимальными названы закалка при 1000 °C в течение одного часа с охлаждением в воде и старение при 470 °C в течение пяти часов; в патенте [4] – предлагается закалка, начиная с 800 °C и двухступенчатое старение при температурах 480–500 °C и 540–550 °C. Уместно создать единую модель влияния температуры на фазовый состав и свойства, поэтому цель работы – систематизация данных и определение границ оптимальных режимов термообработки.

II. МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

а. Объект исследования

В рассмотренных статьях описываются составы классического типа (~0,5-1 % Cr, 0,1-0,3 % Zr) и близкие к ним, например, Cu-0,3 % Cr-0,5 % Zr [3]. Анализ основан на литературных данных [1-3], термодинамическом моделировании фазового состава, результатах измерения микротвёрдости (HV, 100 г, 15 с) и электропроводности вихретоковый метод из [3].

б. Методика расчёта

Методика расчёта построена на зависимости фазового состава от температуры. Температура полного растворения фаз Cr и Zr принимается за нижнюю границу закалки; температуры начала выделения Cr и Cu_5Zr – за ориентир для старения.

Закалка сплавов без полиморфного превращения направлена на возможно более полное растворение избыточных фаз; с ростом концентрации легирующего элемента в твёрдом растворе его прочность возрастает, поэтому пересыщенный раствор прочнее отожжённого [5, с. 196–197]. Верхняя граница закалки определена опасностью пережога и оплавления границ зёрен [5, с. 197–198]. Для оценки

упрочнения использован метод Виккерса (HV), применяемый для тонких слоёв и отдельных структурных составляющих [6, с. 97].

III. РЕЗУЛЬТАТЫ, СРАВНЕНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

а. Фазовый состав и температура закалки

Согласно термодинамическому моделированию, полное растворение фаз хрома и циркония в меди достигается при температурах выше 950 °C, что согласуется с литературными данными: в [1] оптимальной названа закалка при 1000 °C; в [3] использована закалка при 920 °C. С другой стороны, в [2] показано, что активный рост зерна в хромовой бронзе начинается выше 800 °C, а при 900 °C в структуре появляются частицы Cu_5Zr. Таким образом, на основе экспериментальных данных, температура закалки дополнительно ограничена сверху развитием собирательной рекристаллизации.

Таблица 1. Влияние температуры отжига на твёрдость и электропроводность ультрамелкозернистого сплава Cu–0,3 % Cr–0,5 % Zr [3]

Annealing temperature, °C	ST+ECAP		ST+AT+ECAP	
	Vickers hardness, HV	Electrical conductivity, % IACS	Vickers hardness, HV	Electrical conductivity, % IACS
300	195,3	69,5	152,9	76,8
350	194,4	73,0	152,4	76,8
400	188,3	75,8	149,6	78,0
450	184,3	76,0	146,4	79,5
500	173,6	75,4	155,4	79,1
550	149,0	72,9	148,7	74,9
600	125,0	70,4	122,7	72,4
650	111,3	69,5	81,8	69,4
700	84,6	66,1	72,1	64,2

ECAP – Equal-Channel Angular Pressing (равноканальное угловое прессование)

При старении распад пересыщенного раствора повышает прочность и электропроводность [5, с. 200-201]; низкие температуры не дают полного распада, высокие — вызывают коагуляцию.

б. Старение и свойства

По данным [3] для состава Cu-0,3 % Cr-0,5 % Zr максимальные значения микротвёрдости и электропроводности достигаются в интервале 450–500 °C. При 500 °C микротвёрдость составляет ~155 HV. При повышении температуры до 600 °C и выше наблюдается резкое разупрочнение (HV падает до 122,7 при 600 °C и до 72,1 при 700 °C) и снижение электропроводности, что связано с коагуляцией выделений Cu_5Zr.

Таблица 2. Физико-механические свойства классических и экспериментальных бронз [1]

Материал	$\sigma_в$,МПа	НВ	δ,%	$T_{нач.рек.}$, °C	$\rho \cdot 10^{-8}$, Ом·м
БрХ (базовая)	440	125	30	400	2,33
БрХЦр (базовая)	460	145	37	450	2,18
БрХ (экспериментальная)	460	155	25	500	2,08
БрХЦр (экспериментальная)	490	170	27	550	1,98

В [1] для БрХЦр указаны: предел прочности $\sigma_в$ = 490 МПа, НВ = 170, относительное удлинение δ = 27 %, Т начала рекристаллизации = 550 °C, удельное электросопротивление $\rho = 1{,}98 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Это несколько выше, чем в [3], что, однако, объясняется наличием в составе рассматриваемой бронзы модифицирующих лигатур.

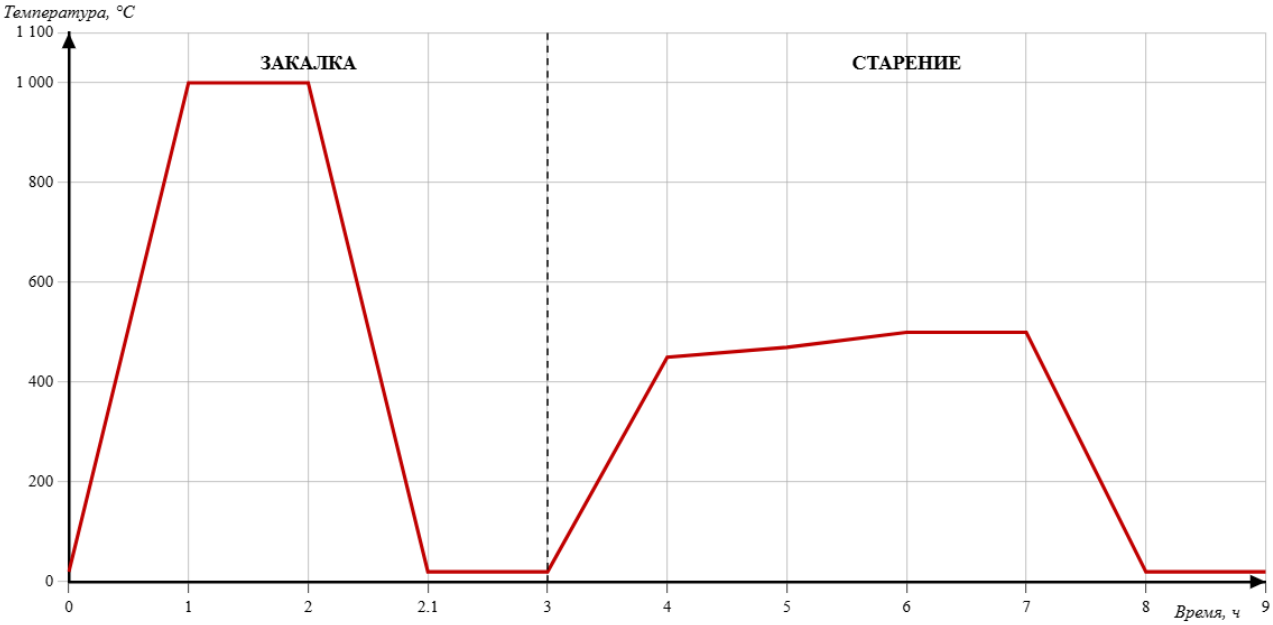


Рисунок 1. Схема температурно-временных интервалов обработки сплавов БрХЦр

в. Сравнение с моделированием

Расчётная температура полного растворения (выше 950 °C) и экспериментальные данные оптимального процесса старения (450-500 °C) согласуются с литературными режимами. Отклонение вниз по температуре закалки ниже 900 °C не обеспечивает полного пересыщения раствора, что снижает эффект старения; отклонение вверх более 1000 °C приводит к росту зерна. При старении ниже 450 °C распад неполный, выше 500 °C – начинается коагуляция.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ литературных данных и результатов термодинамического моделирования показал, что оптимальный интервал температур закалки БрХЦр составляет 950-1000 °C, а температур старения – 450-500 °C. Отклонение от этих интервалов приводит к ухудшению комплекса свойств: при закалке ниже 900 °C не достигается полное пересыщение твёрдого раствора, что снижает эффект последующего старения, тогда как нагрев выше 1000 °C вызывает рост зерна и снижение механических характеристик. При старении ниже 450 °C распад пересыщенного раствора остаётся неполным, а выше 500 °C начинается коагуляция выделений, сопровождающаяся падением микротвёрдости и электропроводности. На основании рассмотренных данных разработана феноменологическая модель термической обработки БрХЦр, описывающая три стадии: закалку старение и коагуляцию. Модель предсказывает оптимальный интервал температур: закалка 950-1000 °C, старение 450-500 °C. Полученные границы согласуются с независимыми экспериментальными данными. Модель может быть использована как составная часть TCAD-подхода при проектировании технологических маршрутов изготовления компонентов из БрХЦр для электронной промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Ловшенко Ф. Г., Ловшенко Г. Ф., Лозиков И. А. Получение, структура и свойства хромовых бронз, легированных механически сплавленными нанокристаллическими модифицирующими лигатурами / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, И. А. Лозиков // Литьё и металлургия. – 2016. – № 2 (83). – С. 69-79.

[2] Effect of nickel on structure of Cu-Cr-Zr bronze after annealing at 800 and 900 °C / Yu. V. Khudorozhkova, S. V. Burov, Yu. S. Korobov, M. S. Devyatyarov // Modern materials and technologies. – 2013. – No. 1. – P. 117-120.

[3] Bodyakova A. I., Lamzina N. A., Botshanov D. S., Lugovskaya A. S., Pilipenko A. G. Effect of treatment on thermal stability of Cu-Cr-Zr alloy / A. I. Bodyakova [et al.] // Synthesis, structure, and properties of high-entropy materials : materials of the international conference. – Belgorod : Belgorod State University, 2020. – P. 45. – URL: https://shea.bsuedu.ru/_files/2021-tez-en.pdf (дата обращения: 02.09.2026).

[4] Патент № 2239670 Российская Федерация, МПК C22C 9/00 (2006.01). Сплав на основе меди : № 2003101234/02 : заявл. 15.01.2003 : опубл. 10.11.2004 / заявитель Институт металлургии УрО РАН. – 4 с. : ил.

[5] Новиков И. И. Теория термической обработки металлов : учебник для вузов / И. И. Новиков. – 4-е изд., испр. и доп. – Москва : Металлургия, 1986. – 480 с.

[6] Лахтин Ю. М. Материаловедение : учебник для машиностроительных вузов / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1990. – 528 с. : ил. – ISBN 5-217-00858-X.

SIMULATION OF THERMAL TREATMENT OF COPPER ALLOYS

E. Kozik, M. Khrushchov, I. Bakshaev, N. Gorshkov, P. Vasiliev, N. Rozhnov, T. Chibirov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation,
MihailKhrushchov@yandex.ru

Abstract: the work is devoted to optimization of heat treatment regimes for Cu–Cr–Zr bronze (BrKhTsr). The influence of quenching and aging temperatures on phase composition, microstructure and mechanical properties is considered. Based on literature analysis and thermodynamic modeling, optimal ranges are proposed: quenching at 950–1000 °C, aging at 450–500 °C. Deviation from these ranges leads either to incomplete decomposition of the supersaturated solid solution or to coagulation of precipitates and grain growth. The work can serve as a basis for a model predicting properties of BrKhTsr after heat treatment.

Keywords: BrKhCrZr, Cu–Cr–Zr, quenching, aging, dispersion hardening, electrical conductivity, microhardness.

UDC 621.382

SPECIFICS OF PARAMETRIC MEASUREMENT OF SEMICONDUCTOR DEVICES USING VERILOG-A

A. F. Filimonova

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus, annafilimonovaf@mail.ru

Abstract: the article examines the specifics of parametric modeling for semiconductor devices using the Verilog-A analog description language. It highlights the main drawbacks of standard SPICE libraries, such as fixed parameter sets, limited adaptability to new component types, and the difficulty of accounting for nonlinear temperature and time dependencies in semiconductor structure characteristics. The stages of constructing a parametric model are described: identifying physical control parameters, formulating a system of analytical equations, replacing fixed coefficients with variables, and final verification against experimental data.

Keywords: parametric modeling, semiconductor devices, Verilog-A, SPICE, computer simulation, nonlinear characteristics.

1. INTRODUCTION: CHALLENGES OF SEMICONDUCTOR DEVICE SIMULATION IN MODERN MICROELECTRONICS

1.1. Limitations of Traditional SPICE Modeling for Modern EDA and Circuit Design

The ongoing evolution of microelectronics, integrated circuit miniaturization, and automated electronic design workflows imposes growing requirements on modern EDA tools and semiconductor device simulation methodologies. Traditional circuit simulation workflows based on standard SPICE model libraries remain widely adopted in industrial CAD systems; however, they exhibit critical limitations that restrict their applicability for advanced analog and mixed-signal circuit design. Conventional SPICE models operate on fixed template structures with static parameter sets, offering limited flexibility for adapting to new semiconductor architectures, updated fabrication processes, and complex nonlinear operating conditions.

A major drawback of template-based SPICE modeling is its inability to dynamically account for temperature drift, frequency-dependent effects, time-based aging degradation, and batch-specific device variations. In modern microelectronics design, where high integration density, low-power operation, and extreme environmental tolerance are mandatory, fixed SPICE libraries often produce significant simulation inaccuracies. These discrepancies negatively affect the entire EDA design pipeline, including circuit schematic verification, transient analysis, parametric optimization, and final prototype validation.

To resolve these modeling limitations within automated design workflows, flexible user-defined modeling techniques have become essential for contemporary EDA practice. The Verilog-A analog hardware description language provides a powerful solution for customizable parametric modeling, fully compatible with modern CAD environments. It enables engineers to construct physical-level device descriptions based on analytical equations rather than predefined templates, significantly improving the accuracy and adaptability of circuit simulation throughout the electronic design automation process.

Parametric modeling via Verilog-A defines semiconductor device behavior through fully configurable mathematical relationships governed by geometric, physical, and operational parameters. This methodology supports iterative model updating, precise environmental dependency adjustment, and custom calibration – all essential capabilities for robust automated analog circuit design in modern EDA systems.

Semiconductor components including diodes, bipolar and field-effect transistors, sensors, and photovoltaic cells demonstrate highly nonlinear current–voltage characteristics sensitive to temperature, supply voltage, operating frequency, and material aging. Standard SPICE models rely on averaged manufacturer parameters and cannot capture device-specific nonlinear behaviors or non-standard physical effects. In contrast, Verilog-A parametric descriptions allow full adjustment of structural geometry, temperature coefficients, load response characteristics, and batch-level calibration, greatly enhancing the reliability of EDA simulation results.

The accuracy of parametric device modeling directly determines the stability of automated design workflows, the quality of circuit optimization, and the efficiency of microelectronic device prototyping. By embedding customizable physical models into EDA tools, designers minimize reliance on generic library components and achieve higher consistency between simulation predictions and real hardware performance.

As a flexible high-level modeling language for analog and mixed-signal systems, Verilog-A fundamentally extends the modeling capability of conventional EDA platforms. Unlike rigid SPICE templates, Verilog-A supports complete mathematical definition of internal physical processes, enabling full parameterization of conductance values, threshold voltages, leakage characteristics, and temperature dependencies. All core device parameters can be modified independently without full code rewriting, which streamlines iterative design refinement in automated circuit development pipelines.

Furthermore, Verilog-A supports complex nonlinear differential equations suitable for describing transient responses, junction charge dynamics, and frequency-dependent component behaviors. Custom Verilog-A models can be seamlessly integrated into mainstream EDA frameworks to supplement or replace outdated SPICE libraries, making them indispensable for designing newly developed semiconductor devices that lack standardized industrial models. The extendable structure of Verilog-A code also facilitates the implementation of environmental dependency models, including temperature fluctuation effects, humidity influence, power supply variation, and long-term structural degradation — key factors for reliable automated circuit validation. The development of complete Verilog-A parametric models follows a standardized workflow compatible with modern EDA design procedures. First, critical physical parameters are defined according to device type, including resistance, leakage current, breakdown voltage, threshold characteristics, sensitivity, and power generation parameters. Second, analytical physical equations are constructed to describe electrical behavior under varying operating conditions, replacing fixed SPICE coefficients with adjustable parametric variables. Finally, completed models are verified through DC analysis, AC frequency response testing, and multi-temperature sweep simulation, with parameter calibration performed by comparing simulated data with experimental measurements.

Compared with conventional SPICE-based design flows, Verilog-A parametric modeling eliminates template constraints and allows full customization of nonlinear and transient physical characteristics. Although custom model development requires additional initial effort, it significantly improves simulation precision and expands the capability boundary of automated analog circuit design, making it highly valuable for advanced microelectronics research and industrial EDA applications.

In engineering practice, Verilog-A parametric modeling enhances multiple automated design tasks: high-precision analog circuit design, low-power photovoltaic system optimization, smart sensor network modeling, transistor switching characteristic tuning, and multi-condition reliability prediction. By improving simulation accuracy within EDA workflows, the methodology reduces physical prototype testing costs, shortens design cycles, and supports multi-variant numerical analysis for circuit performance optimization.

1.2. Software tools supporting Verilog-A for circuit simulation

Modern EDA ecosystem includes both commercial and open-source simulation platforms capable of integrating Verilog-A custom models into automated circuit design pipelines. Popular open-source simulation suites, such as gEDA with ngspice or gnucap backends and QUCS, provide partial Verilog-A support through the ADMS compilation framework. Verilog-A behavioral descriptions are automatically translated into compilable C code and integrated with simulator core modules, enabling open-source customization of device models for academic and low-budget industrial EDA research.

Full commercial EDA platforms, including Cadence and Mentor Graphics environments, provide native Verilog-A compilation and simulation support; however, proprietary licensing limits their accessibility for educational and independent research projects. Alternatively, lightweight multi-platform simulation tools such as Dolphin SMASH and SymicaDE support hybrid SPICE and Verilog-A modeling workflows suitable for mixed-signal automated design. SymicaDE, in particular, offers comprehensive compatibility with Verilog, Verilog-AMS, VHDL, VHDL-AMS, and standard SPICE netlists, enabling unified multi-language EDA simulation across Windows and Linux operating systems

In summary, parametric modeling of semiconductor devices using Verilog-A serves as a vital, high-precision tool in modern scientific research and the engineering design of microelectronic devices. This approach overcomes the inherent limitations of standard SPICE models, allows for the specific accounting of physical and operational parameters, and accurately simulates complex dynamic processes within semiconductor structures. Its configuration flexibility, adaptability, and high mathematical precision drive the demand for Verilog-A in engineering practice and the development of next-generation electronic systems. Future advancements in parametric modeling methodologies using this language aim to create universal, adaptive, next-generation models suitable for a broad range of semiconductor devices. Despite its flexible multi-

language support for automated circuit modeling, SymicaDE presents certain limitations in professional EDA workflows. Its error reporting system is less detailed compared with industrial-grade Cadence Spectre simulation tools, occasionally causing unstable program behavior on outdated or non-native Linux distributions. The inconsistency of cross-platform performance restricts its large-scale industrial deployment, though it remains an effective lightweight solution for academic Verilog-A modeling research and small-scale automated circuit verification.

CONCLUSION

In modern electronic design automation and microelectronics engineering, Verilog-A parametric device modeling represents an advanced and high-precision simulation methodology capable of overcoming the structural limitations of traditional SPICE libraries. By enabling fully customizable physical-level descriptions of semiconductor devices, Verilog-A significantly improves the accuracy, flexibility, and scalability of analog and mixed-signal circuit simulation within standard EDA design pipelines.

The presented modeling approach supports adaptive parameter tuning, multi-environmental condition analysis, and custom nonlinear effect characterization, which are essential for designing miniaturized, high-precision, and reliable modern microelectronic systems. Although custom Verilog-A model development involves increased modeling complexity, its advantages in simulation accuracy and design flexibility substantially optimize automated circuit verification and performance prediction workflows.

Future research will focus on developing universal adaptive Verilog-A modeling frameworks compatible with mainstream EDA tools, aiming to establish standardized parametric modeling solutions for emerging semiconductor devices and next-generation automated circuit design systems.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author sincerely thanks the organizers of the International Scientific and Practical Conference «Computer-Aided Design in Electronics» for the opportunity to present this research work.

REFERENCE

[1] Guipta A., Lams M.S. Estimation Missings Value using Neural Network // J. of Operationals Research Society. – 2016. – Vol. 48. – № 1.– P. 329–339.

[2] Parafiyanovich, T. A. Management of the process of personal and professional development of future teacher-programmers / T. A. Parafiyanovich // Problems of improving the efficiency of the educational process based on information technologies.Based on information technology: materials of the XII International Scientific and Practical Conference (Republic of Belarus, Minsk, April 25, 2019) / editorial board: Yu. E. Kuleshov [et al.]. – Minsk: BSUIR, 2019. – P. 112–116.

СПЕЦИФИКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ VERILOG-A

Филимонова А. Ф.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь,
annafilimonovaf@mail.ru

Аннотация: в статье рассматриваются особенности параметрического моделирования полупроводниковых приборов с использованием языка аналогового описания Verilog-A. Освещаются основные недостатки стандартных библиотек SPICE, такие как фиксированные наборы параметров, ограниченная адаптивность к новым типам компонентов и трудности при учете нелинейных температурных и временных зависимостей характеристик полупроводниковых структур. Описаны этапы построения параметрической модели: физическая идентификация управляющих параметров, формулирование системы аналитических уравнений, замена фиксированных коэффициентов переменными и заключительная верификация на основе экспериментальных данных.

Ключевые слова: параметрическое моделирование, полупроводниковые приборы, Verilog-A, SPICE, компьютерное моделирование, нелинейные характеристики.

УДК 004.312

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ БИСТАБИЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, РЕАЛИЗОВАННЫХ НА ПЛИС

Кайкы М.Н., Иванюк А.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, kaikymykhailo@gmail.com

Аннотация: исследуется возможность использования бистабильного элемента на базе LUT6 в качестве физического источника энтропии для генераторов истинно случайных чисел (ГИСЧ), реализуемых на ПЛИС. На аппаратной платформе ПЛИС Xilinx Zynq-7000 из 1024 бистабильных элементов, синтезированных на примитивах LUT6, выполнена серия экспериментов со всеми возможными конфигурациями обратной связи с целью изучения их нестационарного поведения при инициализации. Для количественной оценки равномерности распределения состояний использовалась метрика единообразия. Показано, что значение единообразия зависит от конфигурации обратной связи и от физического размещения ячеек на кристалле ПЛИС: в большинстве конфигураций более 95 % ячеек обладают нулевым значением единообразия, число ячеек с ненулевым значением единообразия варьируется от 7 до 125 из 1024, а максимальное среднее единообразие не превышает 0,0374. Полученные результаты формируют основу для целенаправленного проектирования ячеек с управляемой степенью рассогласования плеч обратной связи.

Ключевые слова: бистабильный элемент; метастабильность; физически неклонируемая функция; генератор истинно случайных чисел; ПЛИС; LUT6; начальное состояние; единообразие.

I. ВВЕДЕНИЕ

Реализация генераторов истинно случайных чисел (ГИСЧ) на базе ПЛИС требует использования полностью цифровых источников энтропии, способных функционировать в условиях жестких аппаратных ограничений [1]. Среди перспективных источников выделяются бистабильные элементы памяти, поведение которых при нарушении временных характеристик становится недетерминированным [2]. В работе [3] была предложена аналитическая модель управляемого бистабильного элемента, доказывающая возможность перехода в режим автоколебаний для генерации случайных данных, однако при реализации подобных решений на базе ПЛИС критическую роль начинают играть факторы, не учитываемые в программных моделях – задержки в цепях межсоединений. Архитектура ПЛИС характеризуется наличием разветвленной сети коммутационных ресурсов, вносящих технологически зависимые задержки распространения сигналов [4]. Автоматизированная трассировка приводит к различию задержек в плечах обратной связи бистабильных элементов, кроме того, временные характеристики нарастания и спада сигналов, проходящих через коммутационные матрицы, могут существенно различаться, что влияет на условия возникновения метастабильности [5].

II. СТРУКТУРА АППАРАТНОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Рассмотрим структуру разработанного аппаратного блока для проведения исследований на платформе ПЛИС (рисунок 1).

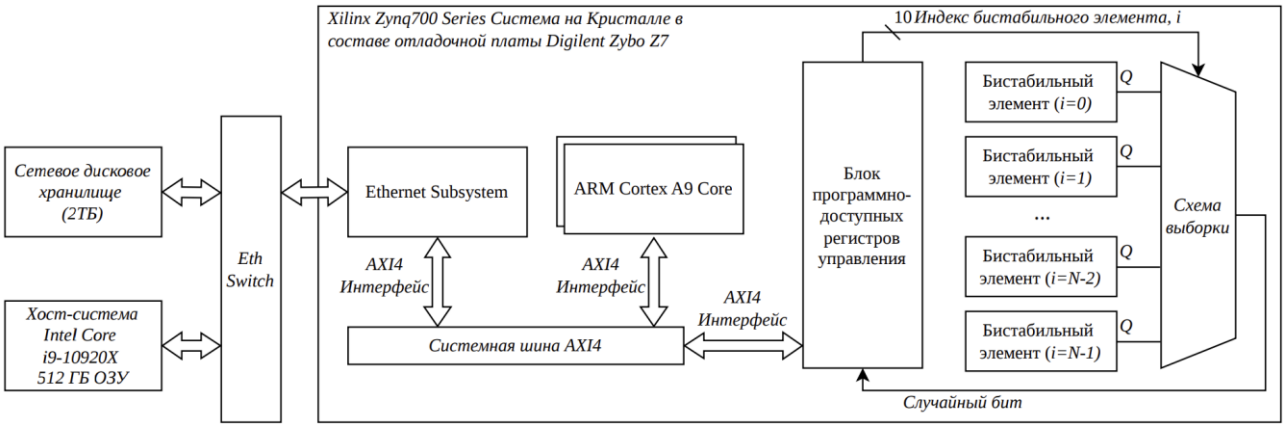


Рисунок 1. Аппаратная платформа для проведения экспериментов

Исследуемыми объектами являются бистабильные элементы, реализованные на примитивах LUT6 ПЛИС семейства Zynq7000 (Xilinx), где каждый из которых состоит из двух шестивходовых элементов переключательной функции LUT6, настроенных на выполнение операции "НЕ" (INV) и охваченных обратной связью, образуя комбинационную петлю (рисунок 2). Оба LUT6 функционально идентичны, а общее количество элементов в системе составляет $N = 1024$.

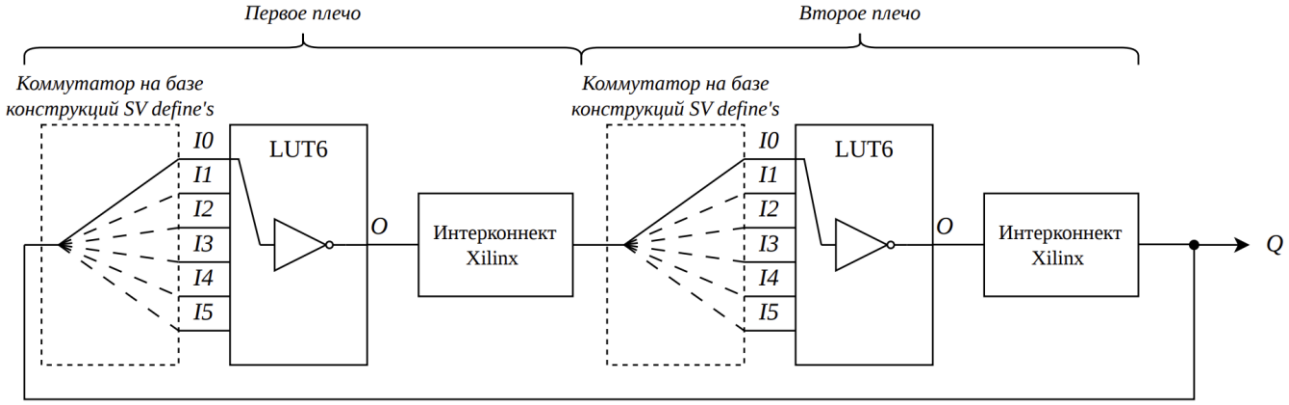


Рисунок 2. Бистабильный элемент на базе примитивов LUT6

Для исследования влияния сетей маршрутизации в экземплярах ПЛИС на качество генерируемых последовательностей начальных состояний элементов были сформированы все возможные 36 конфигураций обратных связей при помощи конструкции *define* препроцессора языка описания аппаратуры SystemVerilog. Для ограничения работы синтезатора также были подготовлены 36 файлов с указанием местоположения каждого из $2 \cdot N = 2048$ элементов LUT6 на кристалле ПЛИС. Разработанное аппаратное обеспечение и файлы ограничений позволили провести эксперимент для выявления зависимости качества начальных состояний бистабильных элементов при инициализации ПЛИС (включении питания) от конфигурации сети маршрутизации на сетях межсоединений.

III. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА НА БАЗЕ ПЛИС

Ход эксперимента заключается в последовательном синтезе дизайна с одной из 36 комбинаций петли обратной связи, различающихся индексом используемого информационного входа LUT6 в первом и втором плечах защёлки. После загрузки конфигурации производится адресный опрос состояния каждой ячейки через общий мультиплексор: выбранный бистабильный элемент подключается к выходному регистру, и его логический уровень на выходе Q фиксируется хост-системой на базе процессорных ядер ARM Cortex A9. Для сбора статистики по всем 1024 элементам опрос повторяется для каждой конфигурации, после чего выполняется серия принудительных перезапусков с полным сбросом программируемой логики. В момент снятия сброса каждый бистабильный элемент под действием обратной связи самопроизвольно переходит в одно из двух устойчивых состояний. Процесс перезагрузки повторяется заданное число раз $K = 1000$, что даёт независимые выборки начальных состояний для всего массива из $N = 1024$ элементов. В результате формируется матрица данных размером $N \times K$, каждая строка которой представляет собой значения начальных состояний всех элементов, а каждый столбец - временной ряд инициализационных значений для отдельной ячейки. Обозначим такие столбцы как V_i.

IV. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

Для анализа полученных данных используем метрику единообразия, которая отображает степень равномерности распределения нулевых и единичных состояний в полученном векторе инициализаций для каждой из ячеек:

$$U_i = 1 - 2 \times \left| \frac{WH(V_i)}{K} - 0{,}5 \right|,$$

где K – количество циклов перезапуска ПЛИС, $WH(V_i)$ – вес Хэмминга вектора V_i, V_i – вектор инициализационных значений для ячейки бистабильного элемента с индексом i.

Метрика единообразия принимает значения в диапазоне [0;1]: значение $U_i = 1$ соответствует идеально сбалансированному элементу, для которой вероятность единичного состояния $P(1) = 0{,}5$, а значение $U_i = 0$ – полностью детерминированному элементу, у которого $P(1) = 0$ или $P(1) = 1$ при всех K перезагрузок. Бистабильный элемент будем называть шумящим, если выполняется неравенство

$0 < WH(V_i) < K$. Для таких элементов метрика единообразия строго положительна: $U_i > 0$. Элементы, у которых $WH(V_i) = 0$ или $WH(V_i) = K$, будем называть детерминированными: их начальное состояние воспроизводится от перезапуска к перезапуску без изменений, а $U_i = 0$. На рисунке 3 приведены столбчатые диаграммы распределения значения единообразия по индексам элементов для двух конфигураций – конфигурации № 0 и конфигурации № 28. Верхний график соответствует конфигурации с наибольшим числом шумящих элементов (125 из 1024), нижний – конфигурации с наименьшим числом таких элементов (7 из 1024). В обоих случаях подавляющее большинство элементов имеет $U_i = 0$, то есть ведёт себя полностью детерминированно, тогда как шумящие элементы распределены по индексам неравномерно. Наблюдаемая картина указывает на то, что начальное состояние бистабильного элемента определяется систематической составляющей, воспроизводимой от перезапуска к перезапуску, а доля случайной компоненты в разрешении состояния крайне мала. На рисунке 4 приведена сводная гистограмма нормированного числа ненулевых ячеек по всем 36 конфигурациям. Каждый столбец соответствует одной конфигурации петли обратной связи, высота графика пропорциональна числу ячеек с $U_i > 0$, нормированному по максимальному значению U_i (конфигурация № 0, 125 ячеек).

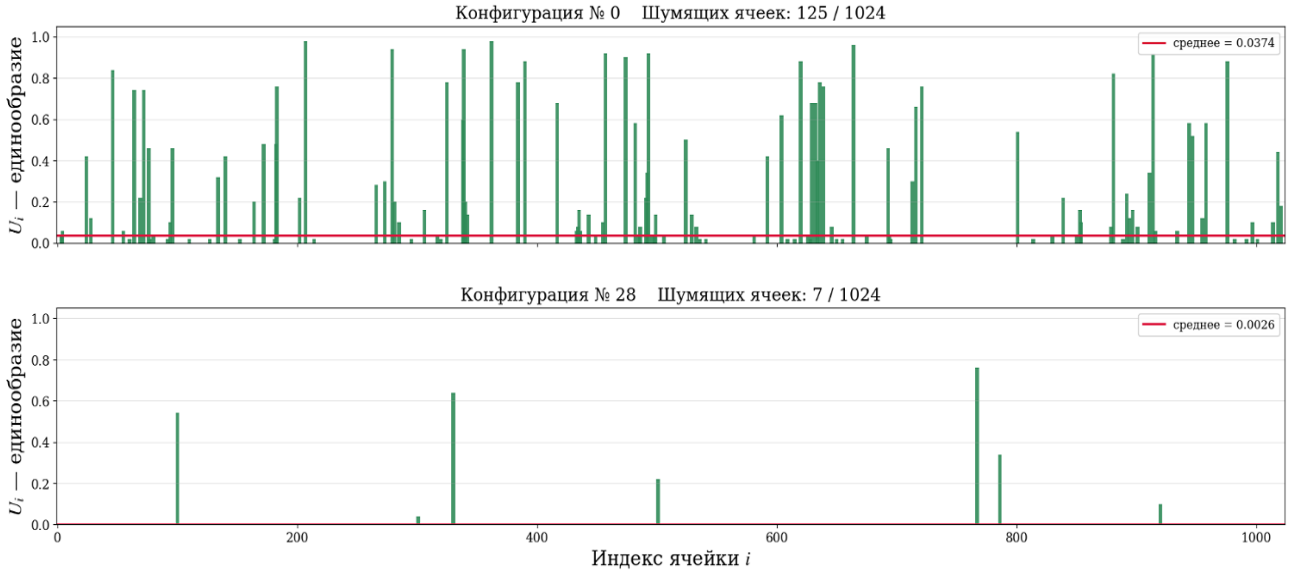


Рисунок 3. Распределение единообразия по ячейкам в разных конфигурациях сетей межсоединений

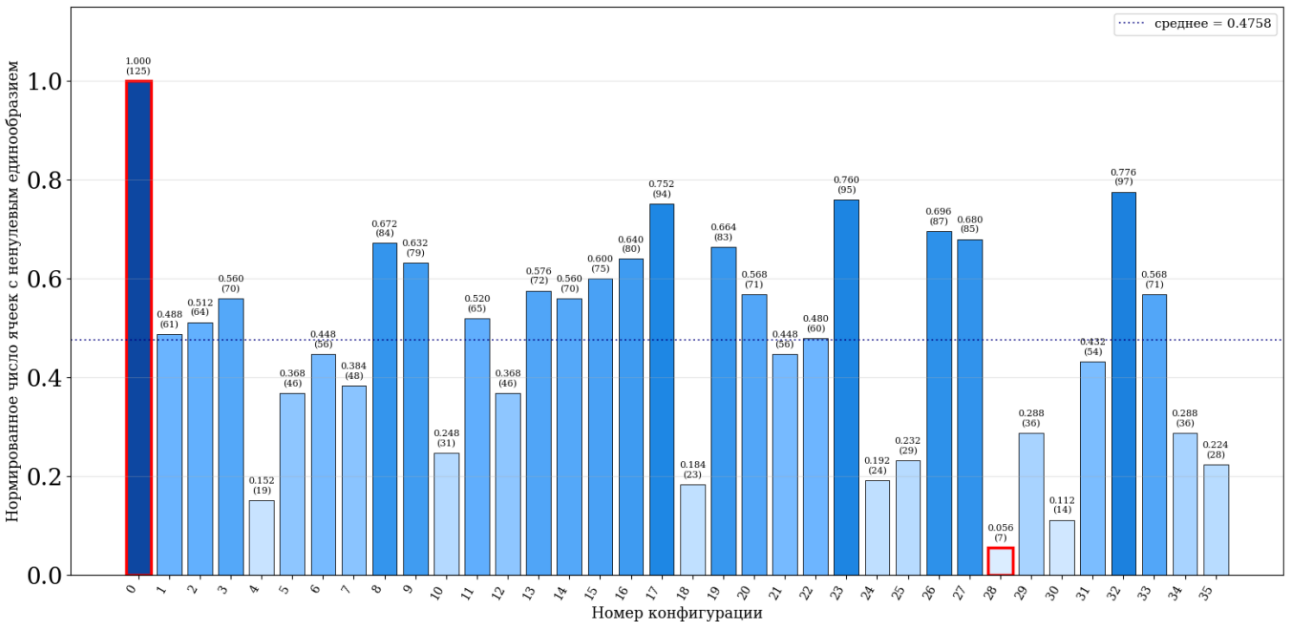


Рисунок 4. Диаграмма распределения нестабильных ячеек по номеру конфигурации

Видно, что распределение конфигураций по числу шумящих ячеек крайне неравномерно: наряду с конфигурациями, дающими 50 – 100 активных ячеек, присутствуют конфигурации с единичными шумящими ячейками (например, № 4 с 12 ячейками, № 25 с 7 ячейками). Среднее нормированное число ненулевых ячеек составляет 0,476, что указывает на значительную вариативность между конфигурациями. Полученные данные показывают, что выбор пары активных входов LUT6 существенно влияет на итоговый уровень случайности при инициализации ПЛИС.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследовано влияние сети межсоединений бистабильных элементов на базе LUT6 в ПЛИС на качество генерируемых случайных последовательностей их начальных состояний. На аппаратной платформе из 1024 бистабильных элементов с 36 возможными вариантами подключения цепей обратной связи выполнена серия экспериментов с многократными перезапусками программируемой логики. Полученные результаты формируют экспериментальную основу для последующего проектирования ячеек с управляемой степенью рассогласования плеч обратной связи и создания на их основе источников энтропии на базе физически неклонируемых функций в ПЛИС.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают искреннюю благодарность резиденту ПВТ компании «Инженерный Центр Ядро», которая является одним из центров разработки YADRO, за предоставленное оборудование для проведения экспериментов в рамках работы совместной учебной лаборатории с Белорусским государственным университетом информатики и радиоэлектроники.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Gassend B., Clarke D., Van Dijk M., Devadas S. Silicon Physical Random Functions. Proc. of the 9th ACM conference on Computer and communications security, CCS ’02. 2002:148–160.

[2] Technical specification Physical random number generators for use in cryptographic information protection tools that do not contain information constituting a state secret: TS 26.4.001-2019: valid from 18.04.2019 / Technical Committee for Standardization "Cryptographic Information Protection". – Moscow 2019. – 20 p.

[3] Кайкы М.Н., Иванюк А.А. Управление метастабильным состоянием элемента памяти с целью генерации случайных данных. Доклады БГУИР. 2025;23(5):75–82.

[4] Иванюк, А. А. Физически неклонируемая функция типа абитр с нелинейными парами путей = Physically non-cloneable arbiter -type function with non-linear path pairs / А. А. Иванюк, А. Ю. Шамына // Системный анализ и прикладная информатика. – 2023. – № 1. – С. 54–62.

[5] Skoric, B. Robust key extraction from physical uncloneable functions / B. Skoric, P. Tuyls, W. Ophey // Int. Conf. on Appl. Cryptogr. and Network Secur. (ACNS’05). – New York, USA, 2005. – P. 407–422.

RESEARCH ON THE BEHAVIOR OF BISTABLE ELEMENTS IMPLEMENTED ON AN FPGA

M. Kaiky, A. Ivaniuk

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
kaikymykhailo@gmail.com

Abstract: the paper investigates the feasibility of using a LUT6-based bistable element as a physical entropy source for True Random Number Generators (TRNGs) implemented on FPGAs. On an experimental platform based on a Xilinx Zynq-7000 FPGA comprising 1024 bistable elements synthesized on LUT6 primitives, a series of experiments was performed with 36 feedback-loop configurations in order to study their non-stationary behavior during initialization. To quantitatively assess the uniformity of the distribution of states, a uniformity metric was used. The uniformity value is shown to depend on the feedback-loop configuration and on the physical placement of cells on the FPGA die: in most configurations more than 95 % of cells have a zero-uniformity value, the number of cells with a non-zero uniformity value varies from 7 to 125 out of 1024, and the maximum average uniformity does not exceed 0.0374. The results obtained provide a basis for the targeted design of cells with a controlled degree of feedback-branch asymmetry.

Keywords: bistable element; metastability; entropy source; physically unclonable function; true random number generator; FPGA; LUT6; initial state; uniformity.

УДК 004.31

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОМПАКТНОГО РЕКОНФИГУРИРУЕМОГО *PUF*-КОНТРОЛЛЕРА

Трубач К.И., Иванюк А.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, xenona11x@gmail.com

Аннотация: разработан реконфигурируемый блок АЛУ для *PUF*-контроллеров, обеспечивающих генерацию случайных чисел и идентификацию устройств в *IoT*. Объединение общих вычислительных примитивов (*LFSR*, *XOR*-деревья, мажоритирование) в едином тракте данных позволяет сократить площадь на *FPGA Artix-7* на 57% по сравнению с раздельной реализацией. При этом микропрограммная перенастройка алгоритмов пред- и постобработки позволяет оперативно адаптироваться к новым криптографическим требованиям без изменения схемотехники.

Ключевые слова: физически неклонируемые функции, реконфигурируемый контроллер, *IoT*.

I. ВВЕДЕНИЕ

Физически неклонируемые функции (*Physically Unclonable Function, PUF*) представляют собой цифровые схемы, чрезвычайно чувствительные к неизбежным технологическим разбросам при производстве. Одна и та же копия схемы на двух разных кристаллах (или даже в разных местах одного кристалла) ведёт себя по-разному, порождая уникальную пару «запрос–ответ» (*Challenge–Response*). Математически *PUF* описывается как *Response=PUF(Challenge)*, где *Challenge* – вектор запроса, *Response* – вектор ответа, а *PUF* – нелинейное отображение, определяемое физическими неоднородностями кристалла. Эти функции служат основой для аппаратной привязки к индивидуальным особенностям чипа и находят применение в самых разных задачах безопасности: генерации истинно случайных чисел (*TRNG*) для формирования ключей шифрования, идентификации устройств (*ID*), аппаратной реализации хэш-функций и других криптографических операций.

Однако каждая *PUF*-функция приобретает собственный набор узкоспециализированных блоков (*BCH*-коды, постобработка *TRNG*, хэширование), что увеличивает площадь кристалла и исключает модификацию алгоритмов без перепроектирования [1–4]. В литературе встречаются отдельные попытки динамически переключать одну *PUF*-структуру между режимом *TRNG* и *PUF*-идентификации [5], однако такое переключение реализуется, как правило, мультиплексированием двух составных частей, а не переиспользованием общих вычислительных ресурсов ради минимизации накладных расходов. В то же время в смежных областях криптографии и безопасности уже применяются реконфигурируемые криптопроцессоры, основанные на простейшем блоке АЛУ и микрокоде со специализированными операциями [6]. Применительно к *PUF* работа, вводящая понятие «потока реконфигурации» для контроллера, отсутствует. Под таким потоком понимается смена микрокода и перекоммутация тракта данных, позволяющие переключать устройство между различными приложениями (или их комбинацией), изменять настройки предобработки запроса и постобработки ответа, причём так, чтобы результирующая архитектура занимала ощутимо меньшую площадь, чем совокупность отдельных узкоспециализированных модулей.

В устройствах Интернета вещей (*IoT*), которые часто включают в себя *PUF* и средства управления ими, остро стоят вопросы энергоэффективности и минимизации площади кристалла. Поэтому данная работа ставит своей целью уменьшить аппаратные затраты на управление *PUF*, сохранив при этом гибкость для адаптации к новым протоколам и алгоритмам. В качестве решения предлагается выделить общие вычислительные примитивы, используемые во всех целевых приложениях (линейный сдвиговый регистр с обратной связью *LFSR*, *XOR*-дерево, мажоритарный элемент, сдвиговые регистры и т.п.), и объединить их в единый микропрограммируемый реконфигурируемый блок АЛУ. На примере рисунка 1 a) такими общими вычислительными примитивами являются функции предобработки *Challenge E*, *D* и постобработки *Response A*, *B*, *C*. Видно, что функции используются в блоках в различных комбинациях и при этом встречаются повторно, что и является примером упомянутой ранее избыточности. Потребление ресурсов можно сократить, если объединить эти блоки в общем тракте данных, как показано на рисунке 1 b). Для коммутации функций вводится дополнительный блок *Configuration Microcode*, хранящий настройку всего модуля и позволяющий переключать устройство между различными функциями (или их комбинацией), изменять настройки предобработки запроса и постобработки ответа без изменения аппаратуры.

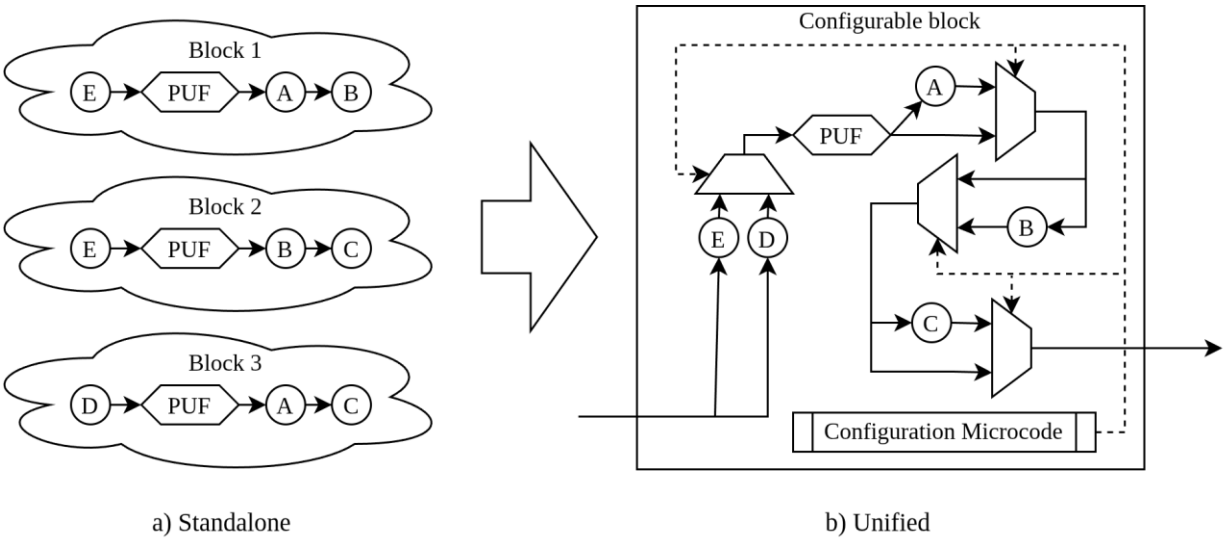


Рисунок 1. Пример перехода от архитектуры с разделяемыми функциями к архитектуре с реконфигурацией аппаратуры и переиспользованием аппаратных блоков

В итоге такой подход даёт возможность адаптироваться к новым требованиям за счёт обновления микропрограммы, а не полного перепроектирования и повторной верификации, что особенно ценно для компактных и энергоэффективных аппаратных корней доверия.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Поскольку физически неклонируемые функции – не одна фиксированная схема, а обширное семейство структур, перед началом проектирования необходимо унифицировать их внешний интерфейс, чтобы впоследствии в надстраиваемое окружение можно было помещать любой вид *PUF* без перестройки всей системы. Как показал анализ имеющихся типов *PUF*, их можно обобщить до схемотехнической модели с минимальным интерфейсом: разрешение работы (*Enable*), сброс (*Reset*), запрос (*Challenge*) и ответ (*Response*). На основе этого интерфейса требуется реализовать как минимум два приложения: идентификацию и генерацию истинно случайных чисел (*TRNG*). Задача – синтезировать микропрограммируемый контроллер, реконфигурирующий предобработку *Challenge* (смена разрядности, алгоритм генерации последовательности) и постобработку *Response* (мажоритарное декодирование, декоррелятор для *TRNG*, *BCH*-кодер или алгоритмы *Helper Data* для *ID*, аддитивный *XOR* для хэша аутентификации). От такого контроллера ожидается сокращение площади по сравнению с суммой отдельных реализаций тех же приложений.

Для обоснования реализуемости и эффективности такого подхода необходимо предварительно исследовать алгоритмическую общность целевых приложений, выделить повторяющиеся вычислительные примитивы (*LFSR*, мажоритарные элементы, деревья *XOR* и т.п.) и количественно оценить потенциальный выигрыш в аппаратных затратах при их совместном использовании. При необходимости адаптации к новому протоколу или уточнённым алгоритмам такой контроллер будет переконфигурирован на уровне микрокода, что открывает путь к более быстрой разработке компактных и энергоэффективных многофункциональных блоков безопасности.

III. АЛГОРИТМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЦЕЛЕВЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ И ВЫДЕЛЕНИЕ ОБЩИХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРИМИТИВОВ

Зафиксировав единый интерфейс блока *PUF* (E*nable*, *Reset*, *Challenge*, R*esponse*), перейдём к рассмотрению алгоритмических надстроек, необходимых для реализации двух и более приложений. Минимально достаточный набор функций, покрывающий ключевые потребности безопасности *IoT*, включает два аспекта. Первый касается алгоритмической природы формирования *Challenge*: это может быть линейный перебор с заданным шагом (положительным или отрицательным) либо псевдослучайная генерация на основе *M*-последовательности или простейших некриптографических хэш-функций (например, функция *djb2*), цель которых – генерировать значения, относительно равномерно распределенные по всему пространству. Второй аспект – постобработка *Response*, которая включает восстановление ответа мажоритарным декодированием, кодами Хэмминга и *BCH*, сжатие с потерей для получения компактной сигнатуры с помощью одно- или многовходового сигнатурного анализатора (*SISR* и *MISR* соответственно), перемешивание битов через *LFSR*.

Следует отметить, что некоторые из перечисленных блоков и алгоритмов имеют структурные пересечения как на низком уровне декомпозиции (например, *LFSR* выступает не только самостоятельной функцией, но и составной частью *SISR* и *MISR*), так и на более высоком (*XOR*-дерево как простейший аппаратный примитив многократно встречается в структуре многих функций. Выбор уровня декомпозиции АЛУ представляет собой компромисс между производительностью и аппаратными затратами. В связи с этим представляет интерес поиск компромиссного решения, объединяющего рассматриваемые функции в рамках единой архитектуры.

Ключевым соображением при таком объединении является то, что вынесение любой логики во внешний интерфейс превращает её в отдельную инструкцию, и чем мельче гранулярность таких инструкций, тем больший объём микрокода потребуется. Поэтому целесообразно начинать с наиболее крупных пересечений между приложениями. В рамках предложенного подхода были реализованы модификации: объединение *LFSR*, *SISR* и *MISR* в общий регистр с мультиплексированием входов; использование этого же *LFSR* в тракте хэш-функции (*djb2*) и *BCH*-кодера вместо собственных сдвиговых регистров; выделение *XOR*-деревьев в отдельную микрооперацию АЛУ. Была разработана программная модель, имитирующая работу объединённого блока АЛУ, что позволило на ранних этапах проектирования получить нижнюю границу ожидаемого выигрыша без необходимости реализации каждой комбинации на аппаратном уровне. Моделирование показало, что описанные ранее модификации дают соответственно 8%, 14% и 1% сокращения ресурсов, а введение общего регистрового файла добавляет ещё 20%, что в сумме даёт 43% консервативной оценки. Таблица 1 указывает, какие аппаратные блоки могут быть переиспользованы разными функциями.

Таблица 1. Соответствие «функция – требуемые вычислительные примитивы»

Функция	*LFSR*	Сумматоры	*XOR*-дерево	Элементы памяти
Линейный выбор с шагом		+		+
Хэш-функция	+	+	+	+
Мажоритарное декодирование				
Сжатие сигнатурным регистром	+		+	
Перестановка бит	+			+
Коды *BCH*	+			
Коды Хэмминга			+	

Исключение таблицы составляет лишь мажоритарное декодирование, которое имеет компактную реализацию и не пересекается в этом с другими функциями. Таким образом, алгоритмический анализ уже на верхнем уровне демонстрирует потенциальную возможность сокращения аппаратных затрат за счёт мультиплексирования вычислительных ресурсов. Численная оценка сокращения, полученная на основе результатов синтеза для *FPGA*, и будет представлена в следующем разделе.

IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛОЖЕННОГО ПОДХОДА

Для проверки гипотезы проведён синтез двух вариантов на *FPGA Artix-7*. Первый вариант (далее – *Standalone*) включает все исходные специализированные модули, перечисленные в разделе III, инстанциированные независимо друг от друга, как это принято в традиционных подходах [5]. Второй вариант (далее – *Unified*) представляет собой разработанный микропрограммируемый блок АЛУ, объединяющий все элементарные вычислительные примитивы в одном блоке с помощью микрокода. В таблице 2 приведены результаты синтеза по основным типам ресурсов для обоих вариантов.

Таблица 2. Сравнение аппаратных затрат на *FPGA Artix-7*

Ресурс	*Standalone*	*Unified*	Сокращение затрат ресурсов
LUT	596	309	48%
Триггеры	250	128	49%
Мультиплексоры	132	28	79%
Общее число блоков	1596	682	57%

Из таблицы видно, что унифицированный блок АЛУ позволяет сократить число логических элементов более чем в два раза. Наиболее значительная экономия достигается за счёт устранения дублирования триггеров и *LUT*. Особенно показательна экономия мультиплексоров (79%), что объясняется заменой множества локальных коммутаторов на единый управляемый тракт данных.

Следует отметить, что в обоих вариантах функциональное поведение осталось эквивалентным: все целевые операции могут быть выполнены последовательностью микроопераций в *Unified*-версии, тогда как в *Standalone* каждая функция реализована жёстко и независимо и реализуется одной

инструкцией. Приведённые результаты подтверждают целесообразность предложенного подхода для устройств с ограничениями по площади и энергопотреблению, характерных для *IoT*-устройств.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в ходе синтеза данные демонстрируют, что микропрограммируемый реконфигурируемый блок АЛУ способен обеспечить значительное (до 57%) сокращение аппаратных ресурсов по сравнению с традиционной реализацией набора специализированных блоков, что напрямую влияет на стоимость кристалла и на статическое энергопотребление. Кроме того, предложенная архитектура обладает свойством масштабируемости: добавление новой функции не требует изменения аппаратной части, а сводится к обновлению содержимого управляющей памяти (микрокода) контроллера без модификации его аппаратного ядра. Дальнейшие направления работы включают реализацию полного контроллера с интеграцией реального *PUF*-ядра и внешних интерфейсов, оценку энергопотребления на основе синтеза в *ASIC* с использованием низкопотребляющих библиотек примитивов, а также разработку автоматизированной среды генерации микрокода на основе высокоуровневого описания алгоритма.

Таким образом, представленные результаты доказывают состоятельность идеи реконфигурируемого микропрограммируемого контроллера для *PUF*-приложений и создают основу для построения компактных и энергоэффективных аппаратных корней доверия для устройств *IoT*. Работа вносит вклад в развитие методов проектирования специализированных вычислителей в области *PUF*, объединяющих в себе гибкость программного управления и эффективность аппаратной реализации.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают искреннюю благодарность резиденту ПВТ компании «Инженерный Центр Ядро», которая является одним из центров разработки YADRO, за предоставленное оборудование для проведения экспериментов в рамках работы совместной учебной лаборатории с Белорусским государственным университетом информатики и радиоэлектроники.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Intrinsic-ID [Электронный ресурс] // Cybersecurity Intelligence. – URL: https://www.cybersecurityintelligence.com/intrinsic-id-1409.html (дата обращения: 17.08.2026).

[2] Baturone I., Román R., Corbacho Á. A unified multibit PUF and TRNG based on ring oscillators for secure IoT devices //IEEE Internet of Things Journal. – 2022. – Т. 10. – №. 7. – С. 6182-6192.

[3] Synopsys DesignWare TRNG Security IP [Электронный ресурс] // Synopsys. – URL: https://www.synopsys.com/designware-ip/security-ip/cryptography-ip/random-number-generators/trng.html (дата обращения: 17.08.2026).

[4] Huang Z., Wang Q. A PUF-based unified identity verification framework for secure IoT hardware via device authentication //World Wide Web. – 2020. – Т. 23. – №. 2. – С. 1057-1088.

[5] Taneja S., Rajanna V. K., Alioto M. In-memory unified TRNG and multi-bit PUF for ubiquitous hardware security //IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2021. – Т. 57. – №. 1. – С. 153-166.

[6] Grand M. et al. A reconfigurable multi-core cryptoprocessor for multi-channel communication systems //2011 IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing Workshops and Phd Forum. – IEEE, 2011. – С. 204-211.

ARCHITECTURE DESIGN OF A COMPACT RECONFIGURABLE PUF CONTROLLER

K.I. Trubach, A.A. Ivaniuk

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
xenona11x@gmail.com

Abstract: this paper presents a reconfigurable ALU for PUF controllers designed to provide random number generation and device identification in IoT systems. By combining common computational primitives (LFSR, XOR trees, and majority logic) into a unified data path, the proposed approach reduces the area overhead on the Artix‑7 FPGA by 57% compared with a separate implementation of the same functions. Furthermore, microprogrammable reconfiguration of pre‑ and post‑processing algorithms enables rapid adaptation to new cryptographic requirements without hardware redesign.

Keywords: physically unclonable functions, reconfigurable controller, IoT.

УДК 004.312

Q-БИТНАЯ ФИЗИЧЕСКИ НЕКЛОНИРУЕМАЯ ФУНКЦИЯ ТИПА КОНФИГУРИРУЕМЫЙ КОЛЬЦЕВОЙ ОСЦИЛЛЯТОР И ОЦЕНКА ЕЕ ХАРАКТЕРИСТИК

Бурко Л.А., Иванюк А.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, burkoliana@gmail.com

Аннотация: в работе исследуются основные характеристики q-битной физически неклонируемой функции (ФНФ) типа конфигурируемый кольцевой осциллятор (ККО). На поданный n-битный запрос данная ФНФ формирует q-битный ответ. Решается задача оценки характеристик стабильности, уникальности и единообразия сформированных ответов для q-битной ФНФ. Стабильность характеризует способность ФНФ воспроизводить один и тот же ответ при многократной подаче одного и того же запроса. Уникальность отражает степень различия ответов, формируемых для различных экземпляров ФНФ на различных ПЛИС (межкристальная уникальность) и внутри одной ПЛИС (внутрикристальная уникальность). Единообразие характеризует равномерность распределения получаемых ответов по множеству всех возможных значений. Приводятся результаты экспериментальных оценок q-битных ФНФ ККО, реализованных на ПЛИС Xilinx ZYNQ 7000.

Ключевые слова: физически неклонируемая функция, конфигурируемый кольцевой осциллятор, стабильность, уникальность, единообразие, ПЛИС.

I. ВВЕДЕНИЕ

Физически неклонируемые функции (ФНФ) представляют собой аппаратный механизм формирования уникального ответа на основе индивидуальных физических особенностей конкретного экземпляра электронного устройства. Эти особенности возникают вследствие технологического разброса параметров при изготовлении и практически невозможно полностью воспроизвести их в другом экземпляре устройства. Поэтому при подаче одинакового входного воздействия на различные экземпляры ФНФ они могут формировать различные ответы, в то время как один и тот же экземпляр при повторном измерении должен сохранять свой ответ. ФНФ применяются для идентификации и аутентификации электронных устройств, защиты аппаратуры и данных, а также в задачах формирования криптографических ключей. Исследование стабильности и уникальности ответов является актуальной задачей при разработке и оценке ФНФ. Особый интерес представляет формирование многобитного ответа, поскольку увеличение его разрядности позволяет расширить множество возможных значений ответа и повысить количество информации, получаемой при одном считывании. В предыдущих исследованиях [1, 2] был проведен анализ характеристик ФНФ на основе конфигурируемого кольцевого осциллятора (ККО). В настоящей работе рассматриваются особенности q-битной архитектуры ФНФ ККО и предлагается оценка ее характеристик с использованием метрик стабильности, уникальности и единообразия сформированных ответов.

В классической архитектуре ФНФ [3] каждому входному воздействию (многобитному запросу) CH соответствует однобитный ответ $R = PUF(CH) \in \{0,1\}$. Такой подход обеспечивает минимальный объем информации, получаемой в результате одного измерения. Для формирования q-битного результата необходимо либо использовать несколько независимых экземпляров ФНФ, либо применять несколько различных запросов и объединять полученные однобитные ответы.

В отличие от классического подхода, в новой предлагаемой архитектуре одному запросу CH_i соответствует q-битный ответ $R_i^q = PUF(CH_i)$, где $CH_i = \{ch_i, MW\}, i \in [0, 2^{n-1}]$, ch_i – n-битный запрос, MW – фиксированное окно измерения в периодах системного сигнала синхронизации [1]. В свою очередь $R_i^q = (r_i^{q-1}, r_i^{q-2}, \dots, r_i^0)$, где $r_i^l \in \{0,1\}$, $l \in [0, q-1]$, q – количество разрядов сформированного ответа. При этом различные значения q-битного ответа могут рассматриваться как символы некоторого алфавита $R_i^q = PUF(CH_i) \in \{0,1,\dots,2^q - 1\}$. Следовательно, при q-битном ответе одному запросу может соответствовать один из 2^q возможных символов алфавита.

II. МЕТРИКИ ОЦЕНКИ q-БИТНОЙ ФНФ ККО

Для оценки качества ФНФ ККО используются три основные метрики: стабильность, уникальность, единообразие. Метрики оценки характеристик однобитных ФНФ являются известными и хорошо изученными. В данной работе предлагается их адаптация для оценки ФНФ ККО, формирующей многобитный ответ.

Стабильность характеризует способность ФНФ ККО воспроизводить один и тот же ответ при многократных запросах в рамках одной конфигурации. Для каждого запроса CH_i выполняется $M > 1$ измерений выходного значения ККО. Для однобитного ответа вероятность появления значения «1» определяется как $p(R_i = 1) = \frac{1}{M}\sum_{j=0}^{M-1} R_i$, где R_i – значение ответа при j-ом измерении для запроса CH_i. Тогда стабильность однобитного ответа определяется как вероятность воспроизведения его наиболее встречаемого значения: $Stability_1(R_i) = max(p(R_i = 1), 1 - p(R_i = 1))$.

Для q-битного ответа $R_i^q = PUF(CH_i) = (r_i^{q-1}, r_i^{q-2}, \dots, r_i^0)$ сначала определяется вероятность появления значения «1» для каждого l-го ($l \in [0, q-1]$) бита $p(r_i^l = 1) = \frac{1}{M}\sum_{j=0}^{M-1} r_i^l$. Тогда стабильность l-го бита определяется как $Stab(r_i^l) = max(p(r_i^l = 1), 1 - p(r_i^l = 1))$. Итоговая стабильность q-битного ответа для запроса CH_i ($Stability_q(R_i^q)$) вычисляется как среднее арифметическое стабильностей его отдельных битов, а общая стабильность ФНФ ККО определяется как среднее значение по рассматриваемым запросам:

$$Stability_q(R_i^q) = \frac{1}{q}\sum_{l=0}^{q-1} Stab(r_i^l), \qquad Stability_q = \frac{1}{T}\sum_{i=0}^{T-1} Stability_q(R_i^q),$$

где T – количество поданных различных запросов.

При этом число рассматриваемых запросов существенно меньше полного пространства возможных значений ($T << 2^n$). Поэтому для экспериментальной оценки стабильности выбирается ограниченное количество запросов, например $T \approx 1000$. При этом высокая средняя побитовая стабильность не гарантирует полного совпадения всего q-битного ответа при каждом измерении. Поэтому для оценки возможности непосредственного воспроизведения ответов дополнительно может использоваться вероятность полного совпадения ответа:

$$P_q^{full}(R_i^q) = \frac{N_{full}(R_i^q)}{M}, \qquad \overline{P_q^{full}} = \frac{1}{T}\sum_{i=0}^{T-1} P_q^{full}(R_i^q)$$

где $N_{full}(R_i^q)$ – количество измерений, при которых сформированный q-битный ответ полностью совпал с эталонным ответом (наиболее встречаемым) для данного запроса.

Уникальность характеризует способность ФНФ ККО формировать уникальные ответы для различных входных воздействий и, соответственно, отсутствие коллизий между ответами на различных экземплярах. Пусть имеются два экземпляра ФНФ ККО a и b. Для одного запроса CH_i формируются однобитные ответы: $R_{a,i}, R_{b,i}$. Тогда уникальность определяется как удельное расстояния Хэмминга: $Uniq_1(R_{a,i}, R_{b,i}) = \frac{1}{T}\sum_{i=0}^{T-1}[R_{a,i} \oplus R_{b,i}]$.

Пусть для одного запроса CH_i два экземпляра ФНФ формируют q-битные ответы: $R_{a,i}^q, R_{b,i}^q$. Тогда уникальность определяется как среднее между удельными расстояниями Хэмминга:

$$Uniq_q(R_{a,i}^q, R_{b,i}^q) = \frac{1}{T \cdot q}\sum_{i=0}^{T-1} HD[R_{a,i}^q, R_{b,i}^q].$$

В идеальном случае значения ответов должны распределяться равномерно по диапазону всех возможных значений ($N = 2^n$), без выраженных пиков и провалов. Единообразие характеризует равномерность появления всех символов алфавита. Данная характеристика позволяет оценить, насколько равновероятно формируются различные значения ответов при изменении запроса.

Для каждого символа k алфавита выходной последовательности определяется число его появлений на T запросах: $C(k) = |\{R_i^q = k\}|$, где $k \in \{0, \dots, 2^q - 1\}, i \in [0, T-1]$. Далее вычисляется информационная энтропия:

$$H = -\sum_{t=0}^{T-1} \frac{C(k)}{T} \log_2 \frac{C(k)}{T}.$$

Максимальное значение энтропии будет равно числу бит в генерируемых символах, т.е. q. Тогда единообразие можно определить как:

$$\overline{Uniformity} = \frac{H}{q} \in [0,1].$$

В рамках эксперимента для каждого экземпляра ФНФ ККО рассматривалось $T = 1024$ различных значений запроса $ch_i \in [0{,}1023]$. Для каждого значения $CH_i = \{ch_i, MW = 5 \times 10^5\}$ на каждом экземпляре ФНФ ККО производилось $M = 1024$ регистраций выходного значения. В эксперименте были использованы четыре ПЛИС (ПЛИС$_1$, ПЛИС$_2$, ПЛИС$_3$, ПЛИС$_4$) на каждой из которых реализовано по четыре ККО (ККО$_1$, ККО$_2$, ККО$_3$, ККО$_4$). Ответ каждого экземпляра ФНФ ККО имеет длину $q = 21$ бит.

Для формирования воспроизводимого ответа ФНФ ККО проведен побитовый анализ стабильности исходного 21-битного ответа. На основании полученных вероятностей выделялись наиболее стабильные битовые позиции. В результате для дальнейшего формирования ответа использовалась стабильная старшая часть, состоящая из 7 бит ($R_i^7 \in \{64, \ldots, 127\}$). После исключения одного бита, не содержащего дополнительной различающей информации, формировался шестибитный ответ в диапазоне $R_i^{7^*} \in \{0, \ldots, 63\}$. Сокращение разрядности при сохранении наиболее стабильных битов позволяет повысить воспроизводимость ответа и использовать его для последующей уникальной идентификации ФНФ. Результаты метрик стабильности представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты метрик стабильности для $q = 21$ бит и $q = 7$ бит

	ККО$_1$		ККО$_2$		ККО$_3$		ККО$_4$	
	$\overline{Stability_{21}}$	$\overline{Stability_7}$	$\overline{Stability_{21}}$	$\overline{Stability_7}$	$\overline{Stability_{21}}$	$\overline{Stability_7}$	$\overline{Stability_{21}}$	$\overline{Stability_7}$
ПЛИС$_1$	0,761	0,996	0,760	0,995	0,761	0,997	0,762	0,997
ПЛИС$_2$	0,763	0,996	0,765	0,998	0,762	0,996	0,765	0,997
ПЛИС$_3$	0,762	0,997	0,761	0,997	0,761	0,996	0,763	0,997
ПЛИС$_4$	0,761	0,997	0,760	0,996	0,760	0,996	0,760	0,996

	$\overline{P_{21}^{full}}$	$\overline{P_7^{full}}$	$\overline{P_{21}^{full}}$	$\overline{P_7^{full}}$	$\overline{P_{21}^{full}}$	$\overline{P_7^{full}}$	$\overline{P_{21}^{full}}$	$\overline{P_7^{full}}$
ПЛИС$_1$	0,0067	0,9913	0,0067	0,9863	0,0067	0,9912	0,0066	0,9905
ПЛИС$_2$	0,0068	0,9869	0,0067	0,9925	0,0067	0,9890	0,0067	0,9894
ПЛИС$_3$	0,0067	0,9907	0,0066	0,9899	0,0066	0,9890	0,0065	0,9920
ПЛИС$_4$	0,0068	0,9914	0,0066	0,9882	0,0065	0,9896	0,0065	0,9872

Далее была проведена оценка уникальности шестибитных ответов, формируемых на основе различных ККО, размещенных как внутри одной ПЛИС, так и на разных ПЛИС. При внутри-кристальном анализе для каждой ПЛИС рассматривались шесть возможных пар ККО. При межкристальном анализе для каждого ККО сравнивались ответы, полученные на четырех различных ПЛИС. Результаты внутрикристального анализа показали, что средние значения уникальности для исследуемых ПЛИС находятся в достаточно узком диапазоне: ПЛИС$_1$ – 0,427734, ПЛИС$_2$ – 0,420058, ПЛИС$_3$ – 0,419027, ПЛИС$_4$ – 0,427544. При межкристальном сравнении получены более высокие значения: ККО$_1$ – 0,482964, ККО$_2$ – 0,478217, ККО$_3$ – 0,479791, ККО$_4$ – 0,482322. Сопоставление результатов показывает, что межкристальная уникальность выше внутрикристальной, что в дальнейшем может быть использовано для задач неклонируемоей идентификации.

Для визуальной оценки единообразия полученные ответы группировались по их числовому значению, после чего строилась гистограмма их распределения. На рисунке 1 по оси абсцисс откладывается значение символа алфавита k, а по оси ординат – количество его появлений $C(k)$ на T запросах. По графику видно, что в исследуемой схеме распределение неравномерное, что требует дальнейшего исследования. Полученные результаты $\overline{Uniformity}$ показывают, что для всех исследованных ПЛИС значения единообразия находятся в диапазоне от 0,860 до 0,924 ($H \in [5{,}16; 5{,}54]$), что может быть приемлемо для генерации истинно случайных последовательностей.

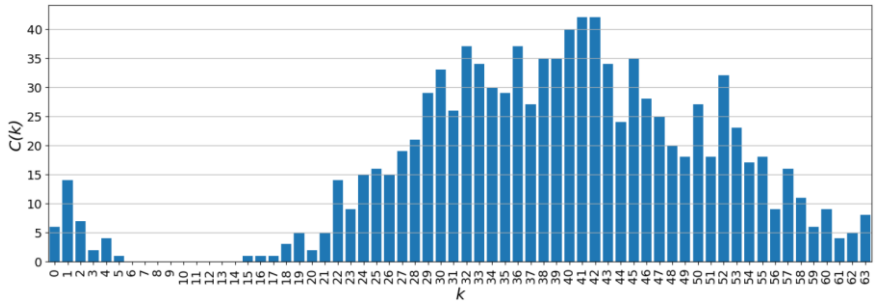


Рисунок 1. Распределение ответов от q-мерного ФНФ ККО

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена архитектура ФНФ ККО, формирующая многобитный ответ на одно входное воздействие. В отличие от классического однобитного представления, использование многобитного ответа позволяет за одно измерение получить больше информации и сформировать расширенный алфавит возможных ответов. Для рассматриваемой архитектуры исходный 21-битный результат был проанализирован с точки зрения стабильности отдельных разрядов, после чего для формирования воспроизводимого ответа была выделена наиболее стабильная часть и сформирован шестибитный ответ. Для оценки полученных ответов были адаптированы метрики стабильности, уникальности и единообразия, позволяющие учитывать особенности многобитного представления. Побитовая оценка стабильности позволяет определить вклад отдельных разрядов в воспроизводимость ответа, а дополнительная оценка полного совпадения позволяет непосредственно характеризовать вероятность получения всего многобитного ответа без изменений при повторных измерениях.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают искреннюю благодарность резиденту ПВТ компании «Инженерный Центр Ядро», которая является одним из центров разработки YADRO, за предоставленное оборудование для проведения экспериментов в рамках работы совместной учебной лаборатории с Белорусским государственным университетом информатики и радиоэлектроники.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Иванюк А.А., Бурко Л.А. Генерирование детерминированных идентификаторов и случайных чисел на основе схемы конфигурируемого кольцевого осциллятора. Информатика. 2025;22(4):65-81. https://doi.org/10.37661/1816-0301-2025-22-4-65-81.

[2] Ivaniuk, A. Unclonable Identification and True Random Number Generation Based on CRO PUF / A. Ivaniuk, L. Burko // Pattern Recognition and Information Processing (PRIP2025): Proceedings of the 17th International Conference, September 16-18, 2025, Minsk, Belarus / UIIP NASB. – Minsk, 2025.– pp. 103-107.

[3] Deng D., Hou S., Wang Z., Guo Y. Configurable ring oscillator PUF using hybrid logic gates. IEEE Access, 2020, vol. 8, pp. 161427–161437. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3021205.

Q-BIT PHYSICALLY UNCLONABLE FUNCTION BASED ON A CONFIGURABLE RING OSCILLATOR AND EVALUATION OF ITS CHARACTERISTICS

L.A. Burko, A.A. Ivaniuk

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
burkoliana@gmail.com

Abstract: this paper examines the main characteristics of a q-bit physically unclonable function (PUF) based on a configurable ring oscillator (CRO). For a given n-bit challenge, the PUF generates a q-bit response. The stability, uniqueness, and uniformity of the generated responses are evaluated for the q-bit PUF. Stability characterizes the ability of the PUF to reproduce the same response when the same challenge is applied repeatedly. Uniqueness reflects the degree of difference between responses generated by different PUF instances on different FPGAs (inter-chip uniqueness) and within a single FPGA (intra-chip uniqueness). Uniformity characterizes how evenly the generated responses are distributed over the set of all possible values. Experimental evaluation results for q-bit CRO-based PUFs implemented on Xilinx ZYNQ 7000 FPGAs are presented.

Keywords: physically unclonable function, configurable ring oscillator, stability, uniqueness, uniformity, FPGA.

УДК 621.382

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАДЁЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОНИКИ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ ВХОДНОГО КОНТРОЛЯ

Боровиков С.М., Будник А.В., Русак И.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, iliaru756@gmail.com

Аннотация: на примере транзисторов КТ872А установлены законы распределения информативных параметров отдельно для классов надёжных (K_1) и потенциально ненадёжных (K_2) экземпляров для нормированной наработки и определены условия моделировании на компьютере обучающей выборки большого объёма. По результатам моделирования получены модели прогнозирования класса надёжности транзисторов тремя методами. Применением моделей к обучающей и четырём контрольным выборкам, включающим по 20 тыс. экземпляров каждая, определена эффективность методов по критерию Байеса. Установлено, что метод с использованием преобразования информативных параметров в троичный код не уступает по эффективности методу потенциальных функций, рекомендованному отраслевым стандартом, но является более простым и понятным для специалистов, легко может быть автоматизирован для использования на входном контроле при отборе надёжных элементов.

Ключевые слова: полупроводниковые приборы, надёжность, прогнозирование, статистическое моделирование, входной контроль.

I. ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение требуемого уровня надёжности радиоэлектронной аппаратуры является одной из приоритетных задач радиоэлектроники. Одним из подходов к обеспечению высокой надёжности радиоэлектронных устройств является отбор на входном контроле элементов, отвечающих требованию надёжности. Для выполнения отбора могут быть использованы методы индивидуального прогнозирования надёжности по значениям информативных параметров элементов в начальный момент времени. В этом случае решение об уровне надёжности экземпляра (единицы элемента) для заданной наработки принимают в виде отнесение его по результатам измерения информативных параметров к одному из двух классов надёжности: K_1 – класс надёжных экземпляров, K_2 – класс потенциально ненадёжных экземпляров. Потенциально ненадёжные экземпляры – это такие экземпляры, которые прошли выходной контроль на предприятии, изготавливающим элементы, и признаны годными для поставки потребителю, однако с большой вероятностью могут отказать раньше заданной (нормированной) наработки t_3 из-за наличия в них скрытых дефектов, не выявленных производственным контролем при изготовлении элементов. Для принятия решения о классе экземпляра (элемента) для заданной будущей наработки используют модель прогнозирования, которая может быть получена разными методами. В технической литературе описывается несколько методов получения моделей прогнозирования [1]. Заслуживает внимания и отраслевой стандарт [2], который рекомендует для использования в промышленности метод потенциальных функций. Однако метод потенциальных функций является сложным для восприятия специалистами промышленности даже среднего звена и, кроме того, вызывает определённые проблемы при его автоматизации.

Относительно простыми и легко поддающимися автоматизации являются методы с использованием преобразования информативных параметров в дискретных код (двоичный или троичный) с принятием решение о классе надёжности экземпляра по полученному для него набору двоичных (единица и нуль) или троичных (единица, нуль или R – неопределённость) кодовых значений. Актуальным является вопрос, как по эффективности прогнозирования класса надёжности для заданной наработки соотносятся эти методы с методом потенциальных функций.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Методы прогнозирования класса надёжности для заданной наработки путём контроля в начальный момент времени информативных параметров в радиоэлектронике получили признание для изделий электронной техники (ИЭТ). Разделение в начальный момент времени выборки ИЭТ на два класса надёжности выполняют путём контроля информативных параметров у каждого экземпляра выборки. Для принятия в начальный момент времени решения о классе экземпляра, к которому он будет принадлежать для интересующей заданной наработки t_3, используют модель прогнозирования, в которую подставляют значения информативных параметров прогнозируемого экземпляра. Модель получают заранее, исследуя на надёжность часть экземпляров той выборки однотипных ИЭТ, для

которой в дальнейшем будет выполняться прогнозирование класса надёжности для наработки $t_з$. Эту часть выборки называют обучающей [1]. Исследования на надёжность экземпляров обучающей выборки называют обучающим экспериментом. Его выполняют, используя ускоренные испытания в течение времени, эквивалентном заданной наработке $t_з$. Модель прогнозирования получают в виде [1]:

$$\begin{aligned} j \in K_1, \text{если } F\left[x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}\right] \geq P_0 \\ j \in K_2, \text{если } F\left[x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}\right] < P_0 \end{aligned} \quad (1)$$

где символ j означает конкретный экземпляр; $x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}$ – значения информативных параметров j-го экземпляра; $F\left[x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}\right]$ – прогнозирующая функция, подсчитанная для j-го экземпляра; k – число информативных параметров, используемых для индивидуального прогнозирования класса надёжности (обычно k = 2…5); P_0 – порог разделения классов, выбираемый экспериментально из условия лучшего разделения на классы экземпляров обучающей выборки.

Полученную модель (1) применяют для прогнозирования класса однотипных экземпляров, не принимавших участия в обучающем эксперименте. Эта процедура включает измерение информативных параметров x_1, …, x_k у прогнозируемого экземпляра, подсчёт значения прогнозирующей функции $F\left[x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}\right]$ и принятие по (1) решения о классе надёжности экземпляра по прогнозу для будущей наработки $t_з$. Необходимость выполнения сложных расчётов по определению прогнозирующей функции $F\left[x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}\right]$, входящей в (1), ограничивает, а во многих случаях сдерживает применение рассматриваемого вида индивидуального прогнозирования в инженерной практике.

Интерес представляют методы, в которых информативные параметры экземпляра (ИЭТ) преобразуют в двоичный код (единица или нуль [1, 3] или троичный код (единица, нуль или R–неопределённость [4–6] и метод потенциальных функций [1, 2]. В первых двух методах модель прогнозирования класса надёжности экземпляров, не принимавших участия в обучающем эксперименте, может быть представлена логической таблицей, показывающей, какой комбинации двоичных или троичных кодовых значений (сигналов) соответствуют по прогнозу экземпляры, например класса K_1.

Возникает вопрос об эффективности указанных методов. В качестве показателя эффективности метода прогнозирования использован Критерий Байеса, представляющий в данном случае вероятность принятия правильных решений $P_{прав}$ в предположении применения модели (1) к экземплярам обучающей и/или контрольной выборок, действительный класс которых для наработки $t_з$ известен по результатам обучающего эксперимента. При использовании реального обучающего эксперимента объём обучающей и контрольных выборок для ИЭТ ограничен, обычно более 100…200 экземпляров. Из-за ограниченных объёмов используемых выборок возникает вопрос о достоверности оценки эффективности методов. Ответ на указанный вопрос можно получить, имея обучающую выборку большого объёма, получаемую статистическим имитационным моделированием обучающего эксперимента, используя возможности компьютерной техники.

Для получения ответа на вопрос об эффективности моделей прогнозирования, получаемых рассматриваемыми методами, экспериментально на примере биполярных транзисторов большой мощности типа КТ872А исследованы закономерности информативных параметров отдельно для классов надёжности K_1 и K_2 и с учётом этого выбраны условия генерирования информативных параметров при статистическом имитационном моделировании на компьютере обучающего эксперимента большого объёма (20 тыс. экземпляров). Пояснение информативных параметров транзисторов КТ872А: $h_{21э}$ – статический коэффициент передачи тока базы в схеме с общим эмиттером, $I_{КБО}$ – обратный ток коллектора, $U_{КЭнас}$ – напряжение насыщения коллектор-эмиттер

Анализируя экспериментальные данные результатов обучающего эксперимента, установлено, что для описания распределения информативных параметров, рассматриваемых отдельно для экземпляров классов K_1 и K_2, не подтверждается гипотеза о нормальном распределении. Установлено, что информативные параметры в классах K_1 и K_2 неплохо описываются смещённым трёхпараметрическим распределением Вейбулла-Гнеденко, в соответствии с которым плотность распределения информативного параметра (обозначен через x) в каждом классе имеет следующий вид [7]:

$$f(x,a,b,c) = \begin{cases} \frac{b}{a}\left(\frac{x-c}{a}\right)^{b-1} exp\left[-\left(\frac{x-c}{a}\right)^{b}\right] \text{для } x > c \\ 0 \text{ для } x \leq c, \end{cases} \quad (2)$$

где $a > 0$ – параметр масштаба; $b > 0$ – параметр формы; c – параметр сдвига, $x > c$.

Используя результаты реального обучающего эксперимента, для (2) получены параметры *a*, *b* и *c* для классов надёжности K_1 и K_2 для случая использования трёх информативных параметров. С учётом этого выбраны условия генерирования при статистическом имитационном моделировании информативных параметров, соответствующих экземплярам классов K_1 и K_2 (табл. 1).

Таблица 1. Условия генерирования информативных параметров

Параметр распределения Вейбулла-Гнеденко	Информативный параметр для экземпляров класса K_1			Информативный параметр для экземпляров класса K_2		
	$x_1 \to h_{21Э}$	$x_2 \to I_{КБО}$	$x_3 \to U_{КЭнас}$	$x_1 \to h_{21Э}$	$x_2 \to I_{КБО}$	$x_3 \to U_{КЭнас}$
a	0,963	0,0889	112,8	0,719	0,062	330,8
b	3,684	4,569	1,310	2,754	2,109	1,430
c	2,717	0,123	421,3	2,529	0,182	400,7

Параметры *a* и с распределения Вейбулла-Гнеденко, указанные в табл. 1, являются размерными. Их размерность: для $I_{КБО}$ – мкА, для $U_{КЭнас}$ – мВ.

Генерирование на компьютере информативных параметров (обозначен через *x*) выполнялось отдельно для экземпляров классов K_1 и K_2, с учётом условий моделирования, указанных в табл. 1, используя вычислительный алгоритм [7]:

$$x = c + a[-\ln(1-r)]^{1/b}, \quad (3)$$

где *r* – числа стандартной равномерной последовательности: числа, распределённые равномерно в интервале (0…1).

Объём обучающей выборки был выбран равным 20 тыс. экземпляров, из них 12 тыс. были представителями класса K_1, а 8 тыс. экземпляров – представителями класса K_2.

Используя результаты обучающего эксперимента, смоделированного на компьютере, были получены модели прогнозирования вида (1) для исследуемых методов. В случае преобразования информативных параметров в двоичный код для каждого из них использовались пороговые уровни, выбор которых описан в [1]. Причём код «1» присваивался той области информативного параметра, которая в основном отвечала экземплярам обучающей выборки класса K_1, а код «0» – экземплярам класса K_2. Кодовое значение *R*–неопределённость в случае преобразования рассматриваемого информативного параметра в троичный код присваивалось области, находящейся между средними значениями этого информативного параметра, соответствующими экземплярам классов K_1 и K_2 обучающей выборки. Для метода потенциальных функций по результатам обучающего эксперимента определялись потенциалы каждого из экземпляров, используя подходы, описанные в [1, 2].

Применяя полученные модели прогнозирования для экземпляров обучающей выборки объёмом 20 тыс. экземпляров, а также к четырём контрольным выборкам, каждая из которых включала тоже по 20 тыс. экземпляров, была определена вероятность принятия правильных решений по результатам прогнозирования $P_{прав}$. С подходом определения $P_{прав}$ можно ознакомиться в [1].

В табл. 2 приведены значения $P_{прав}$, полученные для обучающей выборки, и средние значения $P_{прав}$ – по результатам применения исследуемых моделей к четырём контрольным выборкам.

Таблица 2. Эффективность исследуемых моделей прогнозирования по критерию Байеса

Особенность метода и описание прогнозирующей функции *F*, ссылка на источник	Значение порога P_0	Вероятность $P_{прав}$ для выборки	
		обучающей	контрольной
Преобразование в двоичный код, *F* – сумма вероятностей принадлежности экземпляра к классу K_1 [1,3]	1,62	0,8918	0,8873
Преобразование в троичный код, *F* – суммарная частная информации о классе надёжности прогнозируемого экземпляра [4–6]	0 дв. единиц	0,9326	0,9283
Метод потенциальных функций, *F* – суммарный потенциал прогнозируемого экземпляра [1, 2]	0	0,9352	0,9305

Тенденции эффективности исследуемых методов прогнозирования, указанные в табл. 2, подтверждались и для других типов биполярных, а также полевых транзисторов.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод потенциальных функций и метод с использованием преобразования информативных параметров в троичный код обеспечивают более высокую эффективность прогнозирования по критерию Байеса (максимума вероятности принятия правильных решений по результатам индивидуального прогнозирования класса надёжности ИЭТ для заданной наработки). Сравнительный анализ методов показал, что использование модели прогнозирования с преобразованием информативных параметров в троичный код [4–6] практически не уступает по эффективности методу потенциальных функций, рекомендованному отраслевым стандартом [2] для использования в промышленности, но является более простым и понятным для специалистов, легко может быть автоматизирован для применения на входном контроле предприятий, изготавливающих ответственную электронную аппаратуру, для отбора экземпляров изделий электронной техники, отвечающих требованиям по надёжности.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследования проводились на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники в рамках выполнения НИР ГБ №26-2020 «Методология моделирования информационно-компьютерных систем».

ЛИТЕРАТУРА

[1] Боровиков, С. М. Статистическое прогнозирование для отбраковки потенциально ненадёжных изделий электронной техники: монография / С. М. Боровиков. М.: Новое знание. 2013. 343 с.
[2] ГОСТ 4 ГО 012.007–70 Узлы функциональные. Метод индивидуального прогнозирования надёжности. М.: Изд-во ЦКБ, 1971. 36 с.
[3] Метод прогнозирования надёжности изделий электронной техники / С. М. Боровиков, А. В. Емельянов, А. А. Хмыль, А. И. Бересневич // Доклады НАН Беларуси. 2006. Т. 50, № 4. С. 105–109.
[4] Прогнозирование класса надёжности изделий электронной техники методом преобразования информативных параметров в дискретный код / В. О. Казючиц, С. М. Боровиков, М. П. Батура, Е. Н. Шнейдеров // Доклады ТУСУР. 2023. Т. 26, № 1. С. 91–97.
[5] Боровиков, С. М. Определение эффективности моделей прогнозирования надёжности полупроводниковых приборов методом статистического имитационного моделирования / С. М. Боровиков, А. В. Будник, И. В. Русак // Современные средства связи: материалы XXIX Международной научно-технической конференции. Минск, 31 октября – 1 ноября 2024 г. Минск: БГАС, 2024. С. 27–29.
[6] Боровиков, С. М. Сравнение по критериям Байеса и Неймана-Пирсона моделей прогнозирования надёжности изделий электронной техники / С. М. Боровиков // Технические средства защиты информации: материалы XXIV Международной научно-технической конференции. Минск, 8 апреля 2026 года. Минск, 2026. С. 163–166.
[7] Вадзинский, Р. Н. Справочник по вероятностным распределениям / Р. Н. Вадзинский. СПб: Наука, 2001. 295 с.

EFFECTIVENESS OF RELIABILITY PREDICTION MODELS FOR ELECTRONIC COMPONENTS TO AUTOMATE INCOMING INSPECTION PROCESSES

S. Borovikov, A. Budnik, I. Rusak

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
iliaru756@gmail.com

Abstract: using KT872A transistors as a case study, the distribution laws for informative parameters were established separately for classes of reliable (*K*1) and potentially unreliable (*K*2) units at a normalized operating time, and conditions were defined for the computer simulation of a large-scale training dataset. Based on the simulation results, models for predicting transistor reliability classes were developed using three different methods. By applying these models to the training set and four test sets—each comprising 20,000 units—the effectiveness of the methods was evaluated using the Bayes criterion. It has been established that the method based on converting informative parameters into a ternary code is no less effective than the potential functions method recommended by the industry standard; however, it is simpler and more intuitive for specialists and can be easily automated for use in incoming inspection when selecting reliable components.

Keywords: semiconductor devices, reliability, forecasting, statistical modeling, incoming inspection.

UDC 539.216.1:546.682; 546.86; 621.315.56; 661.669

MODELING OF HYDROGEN ION GENERATION IN THE METALL-GRAPHENE NANOSTRUCTURE CONTAINING ORGANIC COMPLEXES

Simonenko D.A., Soe E.T., Hein C.L., Radziuk D.V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
radziuk@bsuir.by

Abstract: a computational method is introduced to model the hydrogen ion generation in the metal-graphene nanostructure based on copper (Cu) and reduced graphene oxide (rGO) containing organic complexes (Org) by using COMSOL Multiphysics software tool and calculation of the surface potential and current density distribution in their cross-section. This modeling relies on the water-splitting reactions on the surface of metal-graphene nanostructures, yielding hydrogen ion generation, depending on their average diameter. As a result, the exponential increase of hydrogen ions electrochemically generated in these nanostructures upon enlargement of their average diameter from 1 to 100 nm. The rate of such increase of H^+ generation is the highest in Organic-Cu-rGO and Cu and the lowest in Org-rGO nanostructures, which may be indicative of degradation of such a catalyst caused during the electrochemical redox reactions.

Keywords: copper, graphene oxide, nanostructure, hydrogen, antioxidant.

I. INTRODUCTION

The search for novel functionalities of heterogeneous nanostructures is of increasing research interest in photonics, electronics and nanomedicine. Significant progress has been made in several recent developments of inorganic nanostructures based on graphene oxide (GO) or its reduced form (rGO) with controlled shape, size, crystallinity and functionality. Among such rGO-based nanostructures those modified with Cu and organic substances especially stand out [1, 2]. The big advantage of copper nanoparticles over common ones such as Au, Ag, Co or Ce is their relatively low cost and longer period of chemical stability. It is important to note that the biofunctionality of copper nanoparticles including their antioxidant activity is not limited to their inorganic form but also manifests in various organic complexes. The antioxidant activity, which is least studied, like other important properties of copper nanoparticles depend largely on size, structure, shape and the composition and charge carrier efficiency of the surface layer. Their catalytic activity increases significantly as the nanoparticle size decreases. These properties can be improved and enhanced by conjugation of Cu with rGO due to unique surface area, electronic properties, and biocompatibility of the latter. Overall, the strategy of hybridizing rGO with functional organic substances holds great potential not only for enhancing the existing properties of the resulting nanomaterial's components but also for generating new functionality through such cooperative interaction. We have recently shown that antioxidant efficiency of rGO modified with metal oxide and organic substances, e.g. salicylic acid, can be controlled via hydrogen ion generation in their nanostructure in the electrochemical decomposition of water [3]. However, little is known about the capability of hydrogen ion generation in Cu-modified rGO containing organic complexes so far.

II. EXPERIMENTAL SECTION

Mathematical 3D-modeling of current density distribution on the surface of metal-graphene nanostructures with organic complexes was performed in the use of *Comsol Multiphysics* 4.3 software tool (Equation-Based Models). The modeling is based on the fundamental equation of electrical conduction or the retention of charge on the surface of nanostructures [4]:

$$\Delta(-\sigma \Delta U) = 0, \quad (1)$$

where σ –specific electrical conductivity (S/m); U – electrical potential (V).

$$j = ne\langle v\rangle = \sigma E, \quad (2)$$

where j – current density (A/m^2); n – charge carrier concentration (number/m^3); e = 1,6 × 10^{-19} C; $\langle v\rangle$ − average velocity of charge carriers (m/s); E – electric field strength (V/m).

Equation for current density in the surface layer of nanostructures:

$$j = \partial U/\partial t + \Delta(1-U-\sigma^* d \cdot \Delta U) + (U + \Delta U), \quad (3)$$

where t – time (s); σ* – dynamic specific electrical conductivity (S/m); d – thickness of the surface layer (×10^{-9} m).

In the modeling, the electric potential values U (V) were based on electrochemical cyclic voltammetry measurements, using the peak corresponding to the formation of hydroxyl radicals (•OH). The potential distribution along the surface of the nanostructures was calculated by varying their average diameter under the condition of a current density flow indicated by arrows.

Modeling of the electrochemical decomposition of water, yielding hydrogen ion generation, was carried out by *Comsol Multiphysics* 4.3 software tool (Chemical Reaction Engineering − Electrochemical Engineering module). The model of electrochemical water decomposition is based on the electrochemical reactions of water molecule decomposition and chloride ion oxidation at the anode [5]:

$$2H_2O \rightarrow 4H^+ + O_2 + 4\bar{e}, \quad (4)$$

$$2Cl^- \rightarrow Cl_2 + 2\bar{e}. \quad (5)$$

The Nernst-Planck equations allow determination of hydrogen ion concentration at the interface of two media: of an Ag/AgCl needle electrode with an average diameter of 1 mm and a length of 60 mm and nanostructures [6]:

$$\partial C_i/\partial t = \nabla D_i \nabla C_i - Z/|Z_i| V_i C_i \nabla U + V_i^*, \quad (6)$$

$$V_i = D_i F / RT, \quad (7)$$

where C_i – ion concentration (mol/L); D_i – diffusion coefficient (m^2/s); Z_i – magnitude of the charge (C); V_i – ionic mobility ($m^2/V{\cdot}s$); U – field potential (V); V_i^* – rate of ion formation (mol/(L·s)); R – universal gas constant (8.31 J/(K·mol)); T − temperature (K).

In the computation a saturated aqueous KCl solution (4.76 mol/L) was used as the supporting electrolyte at equilibrium potentials of −0.5 V and 1.2 V, corresponding to hydrogen formation at the cathode and oxygen evolution at the anode. The choice of the potential range is determined by the formation of hydroxyl radicals in the electrochemical Fenton process. The following magnitudes were used in the modeling: diffusion coefficient of K^+ $D_K = 1{,}84 \times 10^{-9}$ m^2/s, concentration of K^+ and Cl^- ions at the electrode inlet $C_{K,0} = C_{Cl,0} = 4{,}76$ mol/L, initial anode voltage $U_0 = -0{,}5$ V, diffusion coefficient of H^+ $D_H = 9{,}31 \times 10^{-9}$ m^2/s, temperature $T = 298$ K, K^+ ion mobility $V_K = 7{,}43 \times 10^{-13}$ s·mol/kg, H^+ ion mobility $V_H = 3{,}76 \times 10^{-12}$ s·mol/kg, Cl^- ion mobility $V_{Cl} = 8{,}19 \times 10^{-13}$ s·mol/kg, initial concentration of H^+ ions $C_{H,0} = 1{,}00 \times 10^{-4}$ mol/m^3 and the potential under equilibrium conditions for the calculation of hydrogen ions $U = 0{,}53$ V. Electrical conductivity value σ of crystalline Cu (at $T = 20$ °C) was 58.0×10^6 S/m. The σ value of rGO 3×10^3 S/m was estimated by using the intensities ratio of D and G bands registered in Raman spectra of these nanostructures as IntD/IntG = 1.08 [7] and of organic ligands as 60×10^{-4} S/m [8]. The model of the effective medium (Bruggeman EMA) of the homogeneous distribution without sharp jump in conductivity was used to calculate the electrical conductivity of Org-rGO (0.75×10^3 S/m) and Org-Cu-rGO (5.43×10^6 S/m) nanostructures considering the volume fraction of Cu as 8.0×10^{-2} vol. % and organic ligands 0.5 vol. %.

III. RESULTS AND DISCUSSION

The results of 3D-modeling of the surface potential and current density distribution j (A/m^2) on the surface of nanostructures with an average diameter 10 nm at the applied potential 0.53 V and the rate of its change 1.0×10^{-2} V/s during 250 s are shown in Figure 1. The analysis of peak j values revealed that its highest magnitudes were observed in Cu (1.67×10^5 A/m^2) and Org-Cu-rGO (1.61×10^5 A/m^2) following Org-rGO (1.53×10^4 A/m^2) and rGO (3.09×10^4 A/m^2) if these nanostructures have an average diameter of 10 nm. The computed concentration of hydrogen ion generation (C H^+, mol/m^3) can reach the highest values in Org-rGO (2.0×10^{-3} mol/m^3) and rGO (1.6×10^{-3} mol/m^3), following Cu and Org-Cu-rGO with their values of 1.0×10^{-3} mol/m^3. It was revealed that the C H^+ values (mol/m^3) exponentially increase in these nanostructures as their average diameter becomes higher starting from 1 nm and ending to 100 nm (see Fig. 1). The rate of such increase of H^+ generation is higher in Org-Cu-rGO ($t_1 = -2.56 \times 10^{-2}$ nm^{-1}) and Cu ($t_1 = -2.59 \times 10^{-2}$ nm^{-1}) than in rGO ($t_1 = -3.02 \times 10^{-2}$ nm^{-1}) or Org-rGO nanostructures ($t_1 = -4.12 \times 10^{-2}$ nm^{-1}). The lowest magnitudes of this rate in Org-rGO nanostructures may indicate the possible enhancement of degradation of such a catalyst caused during the electrochemical redox reactions.

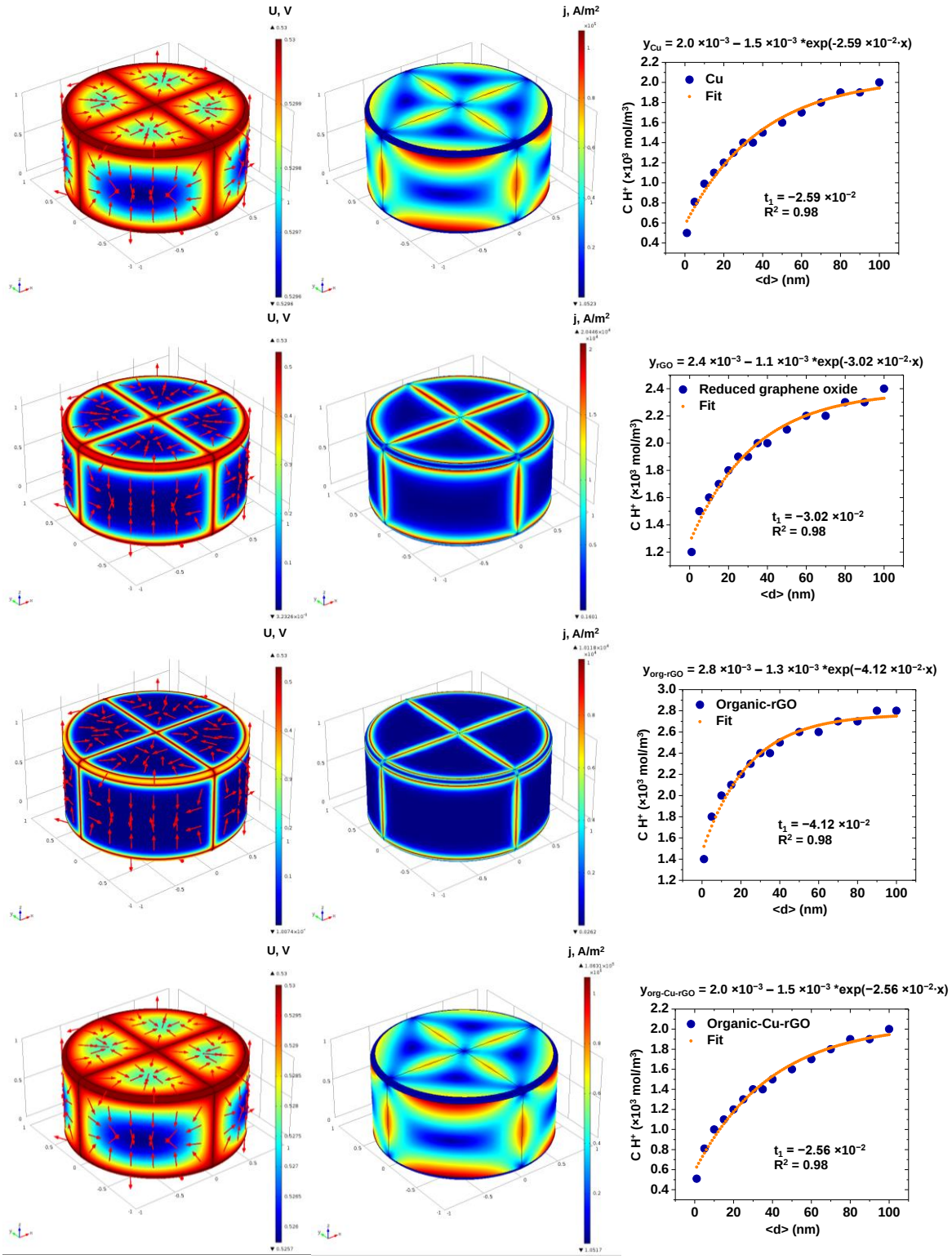


Figure 1. Results of modeling of surface potential distribution (U, V) and current density profile (j, A/m^2) of nanostructures composed of pure Cu and reduced graphene oxide (rGO) before and after complexation with organic substance (Organic-Cu and Organic-Cu-rGO) for calculation of hydrogen ion generation (C H$^+$, mol/m^3) depending on their average diameter (d, nm)

IV. CONCLUSION

A 3D-modeling method is introduced to calculate the hydrogen ion generation in the metal-graphene nanostructure based on copper (Cu) and reduced graphene oxide (rGO) containing organic complexes (Org) using the electrochemical water decomposition. Computation of the surface potential distribution and current density profile of four types of nanostructures (average diameter of 10 nm): Cu, rGO, Org-rGO and Org-Cu-

rGO reveals the highest magnitudes in Cu (1.67×10^5 A/m^2) and Org-Cu-rGO (1.61×10^5 A/m^2) following Org-rGO (1.53×10^4 A/m^2) and rGO (3.09×10^4 A/m^2). However, the amount of hydrogen ions generated in all these nanostructures exponentially increases upon the enlargement of their average diameter from 1 to 100 nm. The rate of such and increase is the highest in Org-Cu-rGO and the lowest in Org-rGO, which may be explained by the possible degradation of the latter due to electrochemical redox reactions.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work is supported by the State Scientific Research Programs 2026−2030 "Chemical processes and technologies" sub-program "Biologically active substances and materials" via grant № 20262451 and "Photonics and microelectronics" sub-program "Microelectronics. Advanced materials and technologies" via grant № 20262155.

REFERENCES

[1] Wu, J. Graphene oxide for photonics, electronics and optoelectronics / J. Wu, H. Lin, D. J. Moss, K. P. Loh, B. Jia // Nature Reviews Chemistry. – 2023. – Vol. 7. P. 162−183.

[2] Zorrón, M. Emerging 2D Nanomaterials-integrated hydrogels: advancements in designing theragenerative materials for bone regeneration and disease therapy / M. Zorrón, A. L. Cabrera, R. Sharma, J. Radhakrishnan, S. Abbaszadeh, M.-A. Shahbazi, O. A. Tafreshi, S. Karamikamkar, H. Maleki // Advanced Science. – 2024. – Vol. 11. Article 2403204.

[3] Mikhnavets, L. Ultrasonic formation of Fe_3O_4 reduced graphene oxide−salicylic acid nanoparticles with switchable antioxidant function / L. Mikhnavets, V. Abashkin, H. Khamitsevich, D. Shcharbin, A. Burko, N. Krekoten, D. Radziuk // ACS Biomater. Sci. Eng. – 2022. – Vol. 8, Iss. 3. – P. 1181–1192.

[4] Frish, S. E. Electric and electromagnetic phenomena / S. E. Frish, A. V. Timoreva // General Physics Course, volume II. – 1962. – 9th edition, revised and expanded. State Publishing House of Physical and Mathematical Literature. Moscow. – P. 516.

[5] Damaskin, B. B. Electrochemistry / B. B. Damaskin, O. A. Petriy, G. A. Tsirlina // Second edition, revised and updated. Moscow «Chemistry», «KolosS». – 2006. – P. 672.

[6] Savelyev, I. V. General Physics Course, volume I. Mechanics, oscillations and waves, molecular physics / I. V. Savelyev // Nauka Publishers. Main Editorial Board for Physics and Mathematics Literature. Moscow. – 1970. – P. 511.

[7] Mohan, V. B. Characterisation of reduced graphene oxide: Effects of reduction variables on electrical conductivity / V. B. Mohan, R. Brown, K. Jayaraman, D. Bhattacharyya // Materials Science and Engineering B. 2015. – Vol. 193. P. 49−60.

[8] Bešter-Rogač, M. Nonsteroidal anti-inflammatory drugs ion mobility: a conductometric study of salicylate, naproxen, diclofenac and ibuprofen dilute aqueous solutions / M. Bešter-Rogač // Acta Chimica Slovenica. 2009. – Vol. 56. P. 70−77.

Моделирование генерации ионов водорода в металлографеновой наноструктуре, содержащей органические комплексы

Д. Симоненко, Е.Т. Со, Ч.Л. Хейн, Д. Радюк

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, radziuk@bsuir.by

Аннотация: в работе представлен вычислительный метод моделирования генерации H^+ в металлографеновой наноструктуре на основе меди (Cu) и кислородсодержащего графена (КГ) с органическими комплексами (Орг), используя программный инструмент *COMSOL Multiphysics* и расчет поверхностного потенциала и распределения плотности электрического тока в ее поперечном сечении. Это моделирование опирается на реакции расщепления воды, протекающие вблизи поверхности металлографеновой наноструктуры, что приводит к генерации H^+ в зависимости от среднего диаметра. Обнаружено экспоненциальное увеличение H^+, электрохимически образованных в таких наноструктурах, по мере увеличения их среднего диаметра от 1 до 100 нм. Скорость подобной увеличенной генерации H^+ является наибольшей в наноструктурах на основе Орг-Cu-КГ и Cu, а наименьшей в наноструктурах Орг-КГ, что может быть обусловлено деградацией такого катализатора, вызванной протеканием электрохимических окислительно-восстановительных реакций.

Ключевые слова: медь, кислородсодержащий графен, наноструктура, водород, антиоксидант.

УДК 621.78.01/.08

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ АДДИТИВНЫМИ МЕТОДАМИ (3D-ПЕЧАТЬ)

Ястребинская Д.В., Гончарова Е.А., Лейченко В.И., Бачев П.А., Солонков А.А., Козик Е.С.

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация,
dialchem.cooperation@mail.ru

Аннотация: в докладе были рассмотрены актуальные вопросы моделирования термической обработки алюминиевых сплавов, полученных аддитивными методами. Проанализированы ключевые проблемы, включая горячее растрескивание при быстрой кристаллизации, окисление порошка, пористость, остаточные напряжения. На оснвое литературных статей продемонстрировано, что введение модификаторов (циркония, скандия, эрбия) способствует формированию мелкой равноосной структуры, снижающей склонность к трещинам. Особое внимание получили современные методы: интеграция CALPHAD с кинетическими моделями, высокопроизводительные расчёты, фазово-полевое моделирование, in-situ термообработка с использованием тепла процесса. В работе рассмотрены перспективные концепции, такие как моделирование «наследственных» дефектов и дислокационной структуры (на примере WAAM с межслойной прокаткой), неизотермические модели выделения фаз (Al_3Sc), управление тепловой историей через опорные структуры с низкой площадной фракцией (LAFS), а также мультимасштабный «цифровой двойник» (фреймворк MALAMUTE, корреляция PSPP). Результатом работы является литературно обоснованная концепция синергетического объединения микроструктурного модифицирования, управления теплоотводом и мультимасштабного цифрового моделирования для реализации полноценной in-situ термообработки алюминиевых сплавов непосредственно в процессе аддитивного производства.

Ключевые слова: моделирование, алюминий, сплавы, термообработка.

ВВЕДЕНИЕ

Аддитивные технологии представляют собой перспективные и активно используемые методы создания 3D-объектов путём послойного нанесения материала, слой за слоем. Свобода проектирования является основным аргументом в пользу внедрения аддитивных технологий. Благодаря 3D-печати удалось облегчить создание деталей сложных геометрических форм, облегчить вес конструкций, при этом повысив точность производства и уменьшив количество отходов.

Помимо вышеперечисленных преимуществ, аддитивное производство открывает возможность комбинировать компоненты в сборках, что позволяет снизить зависимость от механических приспособлений и дополнительных производственных операций[1].

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ТЕХНОЛОГИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Алюминиевые сплавы – универсальный материал для различных областей производств. Их микроструктура при применении аддитивных технологий, в частности селективного лазерного спекания, благодаря высокой скорости кристаллизации представляет собой более однородную и дисперсную структуру, чем методом традиционного литья, где образуется грубая структура с неравномерным распределением фаз. Но при применении подобного метода необходимо обращать внимания на важные факторы, способные повлиять на результат: окисления поверхности порошка, его невысокая и текучесть, низкая поглощающая способность лазерного луча и повышенная склонность к образованию трещин и пористости, относительно высокие усадка при затвердевании и вязкость расплава. Эти трудности могут привести к образованию нежелательных структурных особенностей и дефектов, приводящих к снижению качества материала. Также формируются остаточные напряжения, которые могут приводить как снижению механических свойств, так и образованию трещин, и разрушению материала [2].

Однако основной и самой главной проблемой алюминиевых сплавов при лазерной печати является горячее растрескивание во время быстрой кристаллизации. Во избежание подобного результата вводят модификаторы, цирконий, скандий или эрбий. Эти элементы способны образовывать тугоплавкие наночастицы прямо в расплаве, благодаря чему будут образовываться центры кристаллизации и вместо изначальной структуры сплава в виде длинных столбчатых кристаллов, которые легко растрескиваются, формируется мелкая равноосная структура, что значительно снижает склонность к горячим трещинам [3, 4].

Не менее перспективным методом является термодинамическое моделирование и создание мультимасштабных и предсказательных моделей. Существующие подходы включают в себя такие отрасли, как интеграцию CALPHAD с кинетическими моделями, так как обычный термодинамический расчёт не является работоспособным для скоростей охлаждения при лазерном сплавлении в порошковом слое, поэтому его комбинируют с кинетическими моделями для учёта быстрой кристаллизации и метастабильных фаз, это позволяет предсказывать образование нанометровых фаз, которые при старении трансформируются в эффективные упрочняющие частицы. Не менее активно используют высокопроизводительные расчёты, где вместо единичных симуляций применяются подходы, которые позволяют быстрее оценивать кинетику выделения фаз для большого количества комбинаций состава и параметров термообработки; среди них фазово-полевое моделирование, где используют связывание параметров процесса с конечной морфологией фаз и симуляция эволюции микроструктуры (например, ячеистые структуры α-Al, ликвация кремния) при высоких скоростях охлаждения; и новые подходы к in-situ термообработке, где вместо постобработки используют тепло самого процесса, например управление опорными структурами для снижения теплоотвода позволяет запустить старение прямо в процессе печати и достичь прочности на уровне традиционного пикового старения [5].

НОВЫЕ КОНЦЕПЦИИ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

К современным концепциям можно отнести моделирование «наследственных» дефектов и микроструктуры. Эта идея исследует морфологию и дефекты, которые возникают при печати и не исчезают из материала, а напрямую влияют на конечные свойства после термообработки, такие как поры, остаточные напряжения, дислокационная структура. В своём исследование Чжана и др. (Northwestern Polytechnical University) предлагает высокоточную численную модель для гибридного процесса WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) с межслойной прокаткой, которая учитывает двунаправленное наследование морфологии [6]. Основная идея состоит в том, что морфология наплавленного валика влияет на распределение деформации при прокатке, а геометрия прокатанной поверхности, в свою очередь, изменяет распределение энергии и осаждение материала при последующей наплавке. Существующие модели упрощали это, создавая идеальные геометрические формы, что приводило к ненадёжным прогнозам. Новая модель использует изначальную/истинную морфологию предыдущих проходов в качестве начальных условий. Результаты показали, что боковые ограничивающие ролики значительно улучшают точность рёбер (± 0,01 мм), а оптимизированные параметры (скорость подачи 10 мм/с, температура прокатки 340 °C) позволяют получать высокорёберные алюминиевые компоненты с точностью менее 0,01 мм. При аддитивном производстве в сплавах накапливается огромное количество дислокаций из-за быстрой кристаллизации и повторяющихся термических циклов. Эти дислокации не пропадают при термообработке, а служат движущей силой для последующего выделения фаз и формируют «память» материала.

Ещё одним развивающимся методом является разработка неизотермических моделей выделения фаз, которые напрямую связывают локальную историю тепловых циклов с конечными свойствами. Лю и др. разработали численную модель для прогнозирования распределения предела текучести в тонкостенной детали из Al-Mg-Sc, полученной методом DED (Directed Energy Deposition). Модель рассчитывает радиус и объёмную долю выделений Al_3Sc в процессе термических циклов путём дискретизации процесса на множество изотермических шагов. Радиус выделений восстанавливается путём приравнивания температурных вариаций к эквивалентной термообработке (отжигу). Прогноз хорошо согласуется с экспериментом: предел текучести уменьшается от нижних слоёв к 25-му слою и остаётся постоянным выше, что объясняется влиянием термических циклов внизу и тепловой аккумуляцией вверху [7]. Управление тепловой историей через опорные структуры. Опорные структуры с низкой площадной фракцией (LAFS) можно инженерно проектировать для управления теплоотводом и использования внутреннего тепла процесса для непосредственной внутренней термообработки (In-situ Heat Treatment (IHT)). Использование LAFS значительно продлевает высокотемпературное воздействие при послойном изготовлении, что способствует её существенному упрочнению. Комбинация LAFS с контролем времени позволила получить предел текучести 453 МПа и предел прочности 479 МПа в состоянии as-built - практически идентично традиционно состаренному Scalmalloy [8].

Инновационным методом является создание мультимасштабного «цифрового двойника». Это система, которая связывает процессы, структуру и свойства в виртуальной копии детали. При развитии этой идеи мы получаем снижение брака на треть, прогнозирование свойств в реальном времени, с задержкой в миллисекунды. Программа AMMT (Advanced Materials and Manufacturing Technologies) использует фреймворк MALAMUTE для создания цифрового двойника, который коррелирует условия процесса с конечным продуктом и устанавливает корреляцию PSPP (Process-Structure-Property-

Performance). Подход объединяет физически-обоснованные и ML-модели для прогнозирования микроструктуры. Мультимасштабное моделирование затвердевания Al-Si. Для быстрого затвердевания Al-Si в условиях аддитивного производства разрабатываются мультимасштабные подходы, которые моделируют эволюцию температуры расплава с учётом большого термического переохлаждения. Это критически важно, поскольку классические модели затвердевания не учитывают экстремальные скорости охлаждения. Для решётчатых структур из алюминия создаются цифровые двойники на основе рентгеновской томографии, которые позволяют проводить симуляции на изготовленных ячейках, а не на идеализированных CAD-моделях. Это позволяет учитывать реальные дефекты, возникающие при печати [9].

На основе проведённого анализа представляется целесообразным развивать комплексный подход, объединяющий микроструктурное модифицирование сплава с активным управлением тепловой историей через инженерные опорные структуры (LAFS). В качестве инструментальной основы для реализации данной стратегии предлагается использовать мультимасштабный «цифровой двойник», связывающий неизотермические кинетические модели (CALPHAD) с физически-информированным машинным обучением. Такая связка позволит трансформировать классическую печную термообработку в управляемый in-situ процесс, активно инициируя выделение упрочняющих фаз за счёт внутреннего тепла печати и гарантируя отсутствие горячих трещин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование термической обработки алюминиевых сплавов для эффективных технологий развивается в направлении мультимасштабных и предсказательных подходов. Основной проблемой для изучения и разработок является горячее растрескивание при быстрой кристаллизации, которого можно избежать посредством введения модификаторов, формирующих мелкую равноосную структуру.

Современный методы включают интеграцию с кинетическими моделями, фазово-полевое моделирование и термообработку с использованием тепла самого процесса. Наиболее перспективными новыми концепциями, подтверждёнными недавними исследованиями являются моделирование наследственных дефектов, неизотермические модели выделения фаз, управление тепловой историей через опорные структуры, развитие мультимасштабного цифрового двойника. Всё это создаёт важные предпосылки для автоматизированного управления микроструктурой в реальном времени, для промышленного внедрения аддитивных технологий алюминиевых сплавов.

Ключевым же трендом становится переход от пассивного моделирования к активному управлению процессом, где физически-информированное машинное обучение интегрируется с цифровыми двойниками для контроля микроструктуры в реальном времени. Однако для широкого внедрения необходимы стандартизированные наборы данных и валидация моделей для разных сплавов и методов печати. Это позволит снизить зависимость от постобработки и повысить качество изделий.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Aboulkhair, N. T. 3D printing of Aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium alloys using selective laser melting [Электронный ресурс] / N. T. Aboulkhair, M. Simonelli, L. Parry, I. Ashcroft, C. Tuck, R. Hague // Progress in Materials Science. — 2019. — Vol. 106. — P. 100578. — DOI 10.1016/j.pmatsci.2019.100578. — URL: https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100578 (дата обращения: 13.09.2026).

[2] Сбитнева, С. В. Некоторые особенности структуры алюминиевых сплавов, полученных методом селективного лазерного сплавления (обзор) / С. В. Сбитнева, Е. А. Лукина, И. Бенариеб // Труды ВИАМ. — 2023. — № 1 (119). — Ст. 06. — DOI 10.18577/2307-6046-2023-0-1-69-83. — URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения: 13.09.2026).

[3] Liu, M. High-throughput thermodynamic screening and microstructural engineering for crack-free Al-Mg-Zr alloys in laser powder bed fusion: Synergistic strengthening and hot cracking inhibition [Электронный ресурс] / M. Liu, X. Ma, Y. Zhang, J. Sun, B. Zhang, X. Qu // Journal of Alloys and Compounds. — 2026. — Vol. 1026. — Art. 187742. — DOI 10.1016/j.jallcom.2026.187742. — URL: https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2026.187742 (дата обращения: 13.09.2026).

[4] Sun, J. High-throughput thermodynamic screening and microstructural engineering for crack-free Al-Mg-Zr alloys in laser powder bed fusion: Synergistic strengthening and hot cracking inhibition [Электронный ресурс] / J. Sun, Y. Zhang, X. Ma, M. Liu, X. Qu // Journal of Alloys and Compounds. — 2026. — Vol. 1063. — P. 1–10. — DOI 10.1016/j.jallcom.2026.187742. — URL: https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2026.187742 (дата обращения: 13.09.2026).

[5] Efa D. A., Ifa D. A. Systematic review of multiscale thermal prediction models for FDM/FFF additive manufacturing: Toward digital twin integration with physics-informed machine learning // Results in Engineering. 2025. Vol. 28. Art. 108087. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.108087. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123025041349 (дата обращения: 13.09.2026).

[6] Zhang J., Li H., Zhang X., Ma H., Han X., Han Y., Zhan M. Modeling and simulation of the hybrid WAAM-rolling process for aluminum high-rib components with consideration of multi-pass morphology inheritance // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2026. Vol. 145, iss. 1–2. P. 1091–1110. DOI: 10.1007/s00170-026-18405-x. URL: https://ir.nwpu.edu.cn/handle/39AN3IGR/438112 (дата обращения: 13.09.2026).

[7] Liu X., Di Y., Wang G., Ji L., Yuan Y., Rong Y. Prediction of spatial yield strength distribution in Al–Mg–Sc alloy fabricated by coaxial laser wire directed energy deposition // Virtual and Physical Prototyping. 2025. Vol. 20, iss. 1. P. 1. DOI: 10.1080/17452759.2025.2544757 (дата обращения: 13.09.2026)..

[8] Chua C., Ghasemi A., An J., Luan J., Chua C. K., Sing S. L. Support-enabled heat retention for activating in-situ heat treatment in laser powder bed fusion of high-strength aluminum alloys // Materials Science and Engineering: A. 2026. Vol. 972. Art. 150671. DOI: 10.1016/j.msea.2026.150671. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509326009512 (дата обращения: 14.09.2026).

[9] Tongne A. Modélisation des procédés thermomécaniques : vers le calcul en temps réel pour le jumeau numérique : Habilitation à Diriger des Recherches. Toulouse : Université Toulouse III – Paul Sabatier, 2024. 121 p. URL: https://ut3-toulouseinp.hal.science/tel-04686291v1 (дата обращения: 14.09.2026).

HEAT TREATMENT MODELING OF ALUMINUM ALLOYS PRODUCED BY ADDITIVE METHODS (3D PRINTING)

D.V. Yastrebinskaya, E.A. Goncharova, V.I. Leichenko, P.A. Bachev, A.A. Solonkov, E.S. Kozik

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation, dialchem.cooperation@mail.ru

Abstract: the report examined current issues in the modeling of heat treatment of aluminum alloys produced by additive methods. Key problems were analyzed, including hot cracking during rapid solidification, powder oxidation, porosity, and residual stresses. Based on literature articles, it was demonstrated that the introduction of modifiers (zirconium, scandium, erbium) promotes the formation of a fine equiaxed structure that reduces susceptibility to cracking. Particular attention was given to modern methods: the integration of CALPHAD with kinetic models, high-performance computing, phase-field modeling, and in-situ heat treatment using process heat. The work examined promising concepts such as the modeling of "inherited" defects and dislocation structure (using the example of WAAM with interlayer rolling), non-isothermal models of phase precipitation (Al_3Sc), control of thermal history through support structures with low area fraction (LAFS), as well as a multiscale "digital twin" (MALAMUTE framework, PSPP correlation). The result of the work is a literature-based concept for the synergistic integration of microstructural modification, heat removal control, and multiscale digital modeling to implement full-fledged in-situ heat treatment of aluminum alloys directly during the additive manufacturing process.

Keywords: modeling, aluminum, alloys, heat treatment.

УДК 538.945

КРИТИЧЕСКИЕ СОСТОЯНИЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ СЛОИСТЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР СВЕРХПРОВОДНИК/ФЕРРОМАГНЕТИК

Кушнир В.Н.[1,2], Прищепа С.Л.[2]

[1]Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь, vnkushnir@gmail.com

[2]Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь

Аннотация: в данной работе представлен матричный метод анализа критического состояния сверхпроводимости периодических слоистых структур сверхпроводника/ферромагнетик, основанный на явном решении линеаризованных одномерных уравнений Узаделя. На основе данного метода рассчитаны критические температуры системы $Nb/Pd_{0.81}Ni_{0.19}$ в зависимости от толщин слоев сверхпроводника и ферромагнетика. Исследовано поведение мультипликаторов системы уравнений Узаделя в зависимости от температуры.

Ключевые слова: уравнения Узаделя, матрица монодромии, ноль и пи-состояния.

I. ВВЕДЕНИЕ

Антагонизм сверхпроводящего и ферромагнитного упорядочений порождает многочисленные эффекты, которые были предсказаны и обнаружены на экспериментах с наноструктурами сверхпроводник(S)/ферромагнетик(F) – например, существование сверхпроводящего конденсата в пи-состоянии и генерация в нем триплетных состояний, спин-вентильный эффект [1,2]. Названные эффекты реализуются (или могут быть реализованы) в устройствах сверхпроводниковой наноэлектроники и спинтроники [3–5]. Дополнительные перспективы связаны с периодическими S/F структурами, например, для их применения в устройствах «магноники» [6].

В данной работе предлагается метод расчета критических температур, T_c, сверхпроводящего состояния в периодических S/F структурах в зависимости от их материальных и геометрических параметров, основанный на обнаруженном нами ранее явном общем решении линеаризованных одномерных уравнений диффузионного предела микроскопической теории сверхпроводимости для узаделевских функций Грина [2,7,8]. Проблема критического состояния периодических S/F структур впервые была исследована систематически в классической работе [9] на основе преобразования Фурье – данный метод является асимптотически точным (хотя, ввиду наличия интерфейсов, медленно сходящимся). Впоследствии данная проблема рассматривалась неоднократно на основе приближенных методов, а также, и асимптотически точных (см. работу [10] и список литературы в ней). Нами используется ортодоксальный подход, тот же, что и в [2,7,8]; он является более простым по сути, коль скоро основан на явном решении уравнений теории, и позволяет внести некоторые дополнения в теорию, изложенную в работе [9] (в частности, выявить суть «кроссовера» состояний сверхпроводимости с позиции теории систем с периодическим изменением параметров).

Компьютерное моделирование приведенных в данной работе критических характеристик выполнено с экспериментальными значениями параметров S/F структур системы $Nb/Pd_{0.81}Ni_{0.19}$ (в [9] анализировалась система V/Fe).

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД

Рассматривается периодическая структура, образованная повторением «элементарной ячейки» F/S/F с толщинами S- и F-слоев d_S и $d_F/2$, соответственно, так что период структуры $d = d_S + d_F$. Полагаем, что выполняются условия применимости формализма диффузионного предела микроскопической теории сверхпроводимости, что вполне приемлемо для большей части практически значимых экспериментальных структур. В этом формализме S/F система задана 6-ю параметрами: критической температурой S-материала T_S, длинами когерентности ξ_S и ξ_F, величиной обменной энергии в ферромагнетике E_{ex}, и параметрами S-F интерфейса – отношением нормальных низкотемпературных удельных сопротивлений S- и F-слоев ρ_S/ρ_F, и, наконец, параметром прозрачности Тагирова t_n [2]. Для системы $Nb/Pd_{0.81}Ni_{0.19}$ названные параметры найдены ранее с высокой степенью точности [2], что определило здесь ее выбор как объекта для численных расчетов. Далее, в используемом формализме характеристики сверхпроводящего конденсата полностью определяются синглетной и триплетными составляющими комплексной узаделевской аномальной функцией Грина, индексированными мацубаровскими частотами, принимающими дискретные значения и ограниченными частотой Дебая.

При этом следует учесть, что выбор F/S/F в качестве периода структуры одновременно означает, что F-слои являются монодоменными с сонаправленными магнитными моментами; в таком случае триплетная составляющая аномальной функции Грина редуцируется к одной компоненте, соответствующей проекции спина ноль.

В общем случае узаделевские функции Грина являются решением системы нелинейных уравнений в частных производных, но критическое состояние сверхпроводимости описывается системой линейных обыкновенных дифференциальных уравнений (ЛОДУ). Коль скоро нами найден полный набор фундаментальных решений этой системы ЛОДУ [2,8,9], то ее общее решение удобнее всего строить через матрицант $\mathbf{R}(x, x_0) \equiv \mathbf{R}(x)$ (матрица, образованная фундаментальными решениями и их производными), где ось *OX* направлена ортогонально поверхности слоев, а начало системы координат помещено в середину F-слоя. Тогда вектор-функция критического состояния $\mathbf{Y}(x)$, образованная мацубаровскими компонентами синглетной и триплетной составляющих узаделевской функции Грина и их производными, выразится формулой $\mathbf{Y}(x) = \mathbf{R}(x)\mathbf{Y}(0)$. Далее, поскольку рассматривается система уравнений с периодическими коэффициентами, то, в соответствии с теоремой Флоке – Ляпунова, приходим к стандартной задаче на собственные векторы $\mathbf{Y}(0)$ и собственные значения μ (*мультипликаторы*) для матрицы монодромии $\mathbf{R}(d)$, $\mathbf{R}(d)\mathbf{Y}(0) = \mu\mathbf{Y}(0)$, определяемые из характеристического уравнения $\det(\mathbf{R}(d) - \mu\,\mathbf{1}) = 0$. По требованию ограниченности узаделевских функций Грина требуем существования значений корней характеристического уравнения, по модулю равных единице, $|\mu(T)| = 1$ (иначе говоря, все корни должны лежать на единичной окружности в комплексной плоскости). Данное требование удовлетворяется для некоторого интервала температур, при этом, правая граница этого интервала и есть критическая температура T_c. Помимо расчета T_c, мы решаем задачу о зависимости $\mu(T)$ во всем диапазоне температур $(0, T_c]$, что дает дополнительную информацию о сверхпроводящей системе.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В соответствии с многочисленными вычислениями в периодической S/F структуре могут быть реализованы лишь т.н. 0-, или π- критические состояния с критическими температурами T_0 и T_π, соответственно, за исключением окрестностей точек кроссовера. Точкой кроссовера, d_{cr}, называют точку пересечения кривых $T_0(d_F)$ и $T_\pi(d_F)$. Заметим, что формальное доказательство данного свойства в литературе не приведено. Заметим также, что в специальных случаях возможна реализация т.н. φ-состояния. В наших терминах 0- и π-состоянию соответствуют мультипликаторы μ = 1 и μ = –1, при этом, параметр порядка для 0-состояния – *d*-периодическая функция без нулей, для пи-состояния – 2*d*-периодическая функция с нулем в каждом периоде. На рисунке 1a показаны эти зависимости, рассчитанные для структуры Nb/$Pd_{0.81}Ni_{0.19}$ при нескольких толщинах d_S, а на рисунке 1 – они же в области кроссовера для значения d_S= 26 нм вместе с критической температурой $T_c(d_F)$.

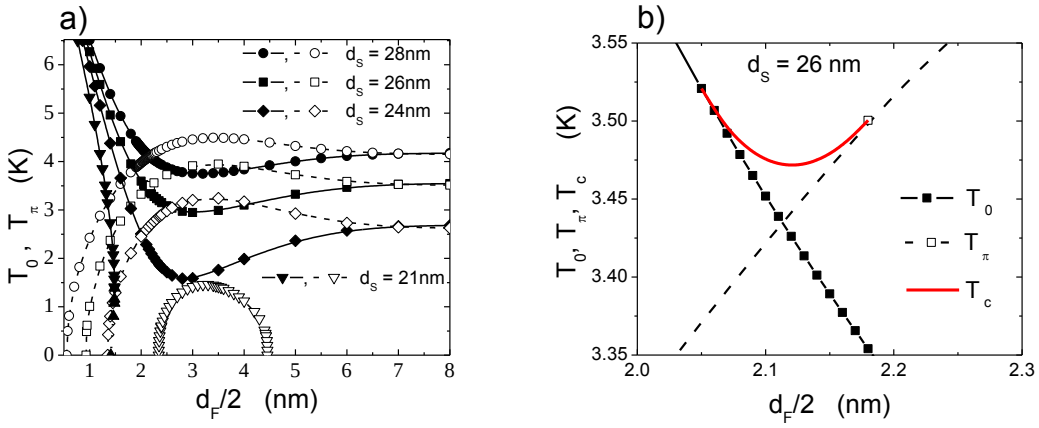


Рисунок 1. a) Зависимости критических температур 0- и π-состояний сверхпроводимости от толщины ферромагнитного слоя (линии со сплошными и штриховые линии с открытыми символами, соответственно) для периодической структуры с элементарной ячейкой $Pd_{0.81}Ni_{0.19}(d_F/2)/Nb(d_S)/Pd_{0.81}Ni_{0.19}(d_F/2)$. b) Те же зависимости для толщины d_S = 26 нм вместе с критической температурой $T_c(d_F)$ (красная линия) в окрестности точки кроссовера

Сравнивая зависимости, рассчитанные здесь для структуры с разреженным ферромагнетиком, с полученными в работе [9], равно как и с характеристиками, представленными в литературе после выхода работы [9], видим, что все они однотипны. В частности, существует минимальная толщина S-слоя, ниже которой наблюдается эффект исчезновения и возврата сверхпроводимости (см. кривые для

толщины d_S = 21 нм). С количественной точки зрения, полученные теоретические характеристики, будучи точными, имеют большое значение для эксперимента. Второй аспект, который необходимо отметить, возникает в силу рассчитанных здесь зависимостей мультипликаторов μ от температуры и от толщин слоев. Результаты, вполне тривиальные с позиции теории уравнений с периодическими коэффициентами, можно суммировать следующим образом: для любых пар значений (T, d_F) из области между кривыми $T_0(d_F)$ и $T_\pi(d_F)$ вне кроссовера, и между кривыми $T_c(d_F)$ и $T_{0(\pi)}(d_F)$ в области кроссовера, решения одномерных линеаризованных уравнений Узаделя для периодических структур ограничены. На первый взгляд, отмеченный аспект выглядит довольно схоластично, поскольку определенные таким образом «виртуальные состояния» являются метастабильными (для $T < T_c$ параметр порядка не является бесконечно малым). Тем не менее, оставляя развитие этой темы для следующей работы, отметим возможность проявления означенных «виртуальных состояний» на переходных резистивных характеристиках (см. [8]).

Теперь обратим внимание на поведение мультипликаторов в окрестностях кроссоверов, то есть, интервалах переходов сверхпроводящего состояния с ветви $T_0(d_F)$ на $T_\pi(d_F)$ и наоборот. Они определены как интервал I_{cr} значений d_F, при прохождении которого величина μ изменяется от 1 до –1 (или наоборот). Новое понимание кроссовера возникает, как только мы рассмотрим «эволюцию» мультипликаторов с увеличением T при фиксированном $d_F \in I_{cr}$. Рисунок 2 отражает это изменение на пяти графиках положения мультипликаторов на единичной окружности в комплексной плоскости.

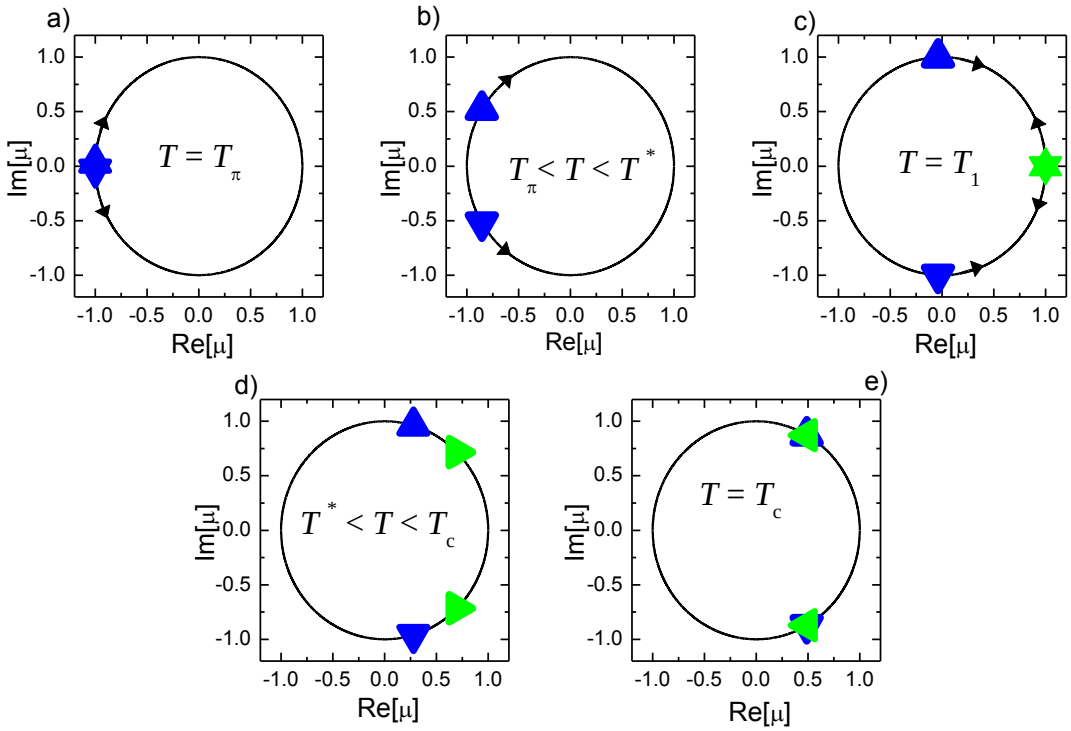


Рисунок 2. Эволюция корней характеристического уравнения для матрицы монодромии уравнений критического состояния сверхпроводимости при увеличении температуры от T_π до T_c. Стрелками указано направление движения корней

Начальной точке с $T = T_\pi(d_F < d_{cr})$ соответствует корень характеристического уравнения $\mu = -1$ (рис. 4a). При увеличении температуры два комплексно-сопряженных корня характеристического уравнения расходятся (рис. 4b), двигаясь по единичной окружности в комплексной плоскости вплоть до точек $\mathrm{Re}[\mu_1] \pm \mathrm{Im}[\mu_1]$, заданных некоторой характерной температурой T_1 (рис. 4c). При этом значении T возникают, как видим, еще два корня в точке 0-состояния, то есть, происходит вырождение. Далее, при возрастании температуры от T_1 до критической T_c две пары корней движутся по верхней и нижней ветви окружности в комплексной плоскости навстречу друг другу (рис. 4d). Критическому состоянию с температурой T_c соответствует их слияние в пару $\mathrm{Re}[\mu_c] \pm \mathrm{Im}[\mu_c]$ с критическим значением μ_c (рис. 4e).

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, нами представлен метод расчета характеристик критического состояния сверхпроводимости периодических структур сверхпроводник/ферромагнетик в диффузионном пределе микроскопической теории, обладающий следующими преимуществами. Во-первых, он является

точным, что обусловлено существованием явной формы общего решения системы линеаризованных одномерных уравнений Узаделя (в этом смысле данную систему можно отнести к «специальному виду»). Во-вторых, с точки зрения компьютерных вычислений он является простым, поскольку периодическая структура представлена «элементарной ячейкой». В-третьих, развитие метода предопределено существованием развитой теории уравнений с периодическими коэффициентами.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнялась при финансовой поддержке по проекту ГПНИ «Современное материаловедение, перспективные материалы и новые технологии» (2026–2030).

ЛИТЕРАТУРА

[1] Buzdin, A. I. Proximity effects in superconductor-ferromagnet heterostructures / A. I. Buzdin // Reviews of Modern Physics. 2005. Vol. 77, No 3. P. 935–976. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.77.935.

[2] Кушнир, В. Н. Сверхпроводимость слоистых структур / В. Н. Кушнир. Минск: БНТУ, 2010.

[3] Golubov, A. A. The current-phase relation in Josephson junctions / A. A. Golubov, M. Yu. Kupriyanov, E. Il'ichev // Reviews of Modern Physics. 2004. Vol. 76, No 2. P. 411–469. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.76.411.

[4] Kushnir, V. N. Basic superconducting spin valves / V. N. Kushnir, A. Sidorenko, L. R. Tagirov, M. Yu. Kupriyanov // Functional nanostructures and metamaterials for superconducting spintronics. From superconducting qubits to self-organized nanostructures. Springer series NanoScience and Technology; ed.: A. Sidorenko. Springer Int. Pub. AG, part of Springer Nature. 2018. P. 1–29. https://doi.org/10.1007/978-3-319-90481-8_1.

[5] Tagirov, L. R. Superconducting triplet proximity and Josephson spin valves / L. R. Tagirov, M. Yu. Kupriyanov, V. N. Kushnir, A. Sidorenko // Functional nanostructures and metamaterials for superconducting spintronics. From superconducting qubits to self-organized nanostructures. Springer series NanoScience and Technology; ed.: A. Sidorenko. Springer Int. Pub. AG, part of Springer Nature. 2018. P. 31–47. https://doi.org/10.1007/978-3-319-90481-8_2.

[6] Ferromagnet/Superconductor Hybrid Magnonic Metamaterials / I. A. Golovchanskiy [et al.] // Advanced Science. 2019. Vol. 6. P. 1900435-1–8. https://doi.org/10.1002/advs.201900435.

[7] Кушнир, В. Н. Критическая температура многослойных наноструктур сверхпроводник/ферромагнетик / В.Н. Кушнир // Доклады БГУИР. 2007. Т. 5, № 4. С. 48–57. https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/31283.

[8] Kushnir, V. N. Multiple order parameter configurations in superconductor/ferromagnet multilayers / V. N. Kushnir [et al.] // Physical Review B. 2011. Vol. 84. P. 214512-1–10. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.84.214512.

[9] Radović, Z. Transition temperatures of superconductor-ferromagnet superlattices / Z. Radović [et al.] // Physical Review B. 1991. Vol. 44, No 2. P. 759–764. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.44.759.

[10] Бакурский, С. В. Эффект близости в многослойных структурах с чередующимися ферромагнитными и нормальными слоями / С. В. Бакурский [и др.] // Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 102, № 9. С. 670 – 677. https://doi.org/10.7868/S0370274X15210043.

CRITICAL STATES OF LAYERED PERIODIC SUPERCONDUCTOR/FERROMAGNET STRUCTURES

V.N. Kushnir[1,2], S.L. Prischepa[2]

[1]Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus, vnkushnir@gmail.com

[2]Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Abstract: the matrix method for analyzing the superconducting critical state of periodic superconductor/ferromagnet structures, which based on the explicit solution of linearized one-dimensional Usadel equations, has presented. On the base of this method, the critical temperatures of the Nb/ $Pd_{0.81}Ni_{0.19}$ system were calculated as functions of the superconductor and ferromagnet layer thicknesses. The temperature dependence of the characteristic multipliers of the system of Usadel equations has investigated.

Keywords: usadel equations, monodromy matrix, zero and pi states.

УДК 621.396.677.8:004.942

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ В ЗАДАННОЙ ПОЛОСЕ ЧАСТОТ

Зайко Е.И., Насонова Н.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, ravenr.nosignall@gmail.com

Аннотация: рассмотрена частотно-селективная поверхность (*ЧСП*) на основе периодического массива медных крестообразных элементов, нанесенных на диэлектрическую подложку с ε_r = 3.5 и толщиной 1 мм. Проведено электродинамическое моделирование фрагмента 10×10 элементов при нормальном падении плоской волны в диапазоне 4–18 ГГц. Исследовано влияние длины креста *L*, ширины полосы *w_Cu*, периода решётки *p* и толщины подложки *h* на частотные зависимости коэффициентов передачи *S21* и отражения *S11*. Показано, что увеличение длины креста смещает резонанс *S21* вниз по частоте, а ширина полосы и период определяют глубину резонанса. Полученные зависимости позволяют выбирать начальную геометрию резонансной *ЧСП* и могут быть использованы при разработке переключаемых метаповерхностей.

Ключевые слова: частотно-селективная поверхность, коэффициент передачи, крест, электродинамическое моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Частотно-селективные поверхности (*ЧСП*) применяются для управления прохождением и отражением электромагнитного излучения в заданных диапазонах частот. Одним из простых и технологичных вариантов *ЧСП* является периодическая поверхность из металлических элементов в форме креста, нанесенных на диэлектрическую подложку. Благодаря симметрии элемента его резонансные свойства слабо зависят от поляризации падающей волны, что упрощает проектирование и интегрирование в состав антенных систем.

Такая структура может использоваться как резонансная или полосно-заграждающая метаповерхность. Ее характеристики определяются формой элемента, размерами креста, периодом решетки, толщиной и диэлектрической проницаемостью подложки. Варьируя эти параметры, можно целенаправленно смещать резонансную частоту и управлять шириной рабочей полосы, что важно при проектировании структур под конкретный диапазон.

Цель работы состоит в определении частотных характеристик *ЧСП* на основе периодического массива медных крестов и исследовании влияния геометрических параметров элементарной ячейки на коэффициенты передачи *S21* и отражения *S11* в диапазоне 4-18 ГГц.

Частотно-селективные поверхности представляют собой периодические металлические массивы, нанесенные на диэлектрическую подложку, которые избирательно пропускают или отражают электромагнитные волны в заданных диапазонах частот. Благодаря этому они широко применяются в радиопрозрачных укрытиях, дихроичных зеркалах, поглотителях и системах снижения радиолокационной заметности, а также в задачах электромагнитной защиты и экранирования. В качестве базовых элементов *ЧСП* чаще всего используют крестообразные и петлевые структуры, при этом крест обычно резонирует, когда его длина близка к половине длины волны, что делает такие элементы удобной основой для построения как полосно-пропускающих, так и полосно-заграждающих фильтров.

I. МОДЕЛЬ БАЗОВОЙ ЯЧЕЙКИ

Базовая элементарная ячейка представляет собой медный крест (рисунок 1), сформированный двумя взаимно перпендикулярными прямоугольными полосами. Крест расположен на подложке с относительной диэлектрической проницаемостью 3.5 и толщиной 1 мм.

Основные параметры ячейки: *p* – период по осям *x* и *y, L* – полная длина креста, *w_Cu* – ширина медной полосы, *t_Cu* – толщина медного слоя, *h* – толщина подложки, ε_r – диэлектрическая проницаемость подложки, *s* – зазор между крестами.

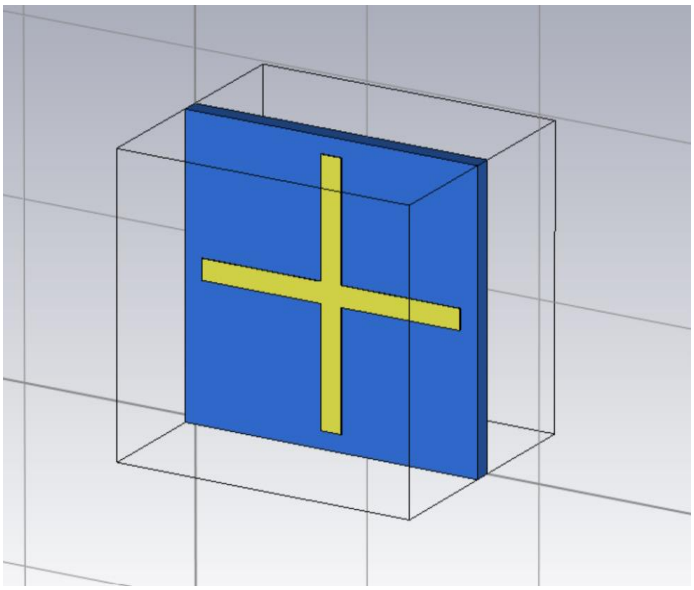


Рисунок 1. Модель крестообразного элемента ЧСП

В работе выполнялось электродинамическое моделирование конечного фрагмента частотно-селективной поверхности, состоящего из 10×10 крестообразных медных элементов, размещенных на диэлектрической подложке. Возбуждение задавалось нормально к поверхности, вдоль оси z, с регистрацией падающей, отраженной и прошедшей электромагнитных волн. По результатам расчёта определялись частотные зависимости коэффициентов S11(f) и S21(f) в диапазоне 4-18 ГГц, частота и глубина резонанса S21, ширина резонансной области и положение максимума отражения. Такой подход позволяет оценить резонансные свойства практически реализуемого фрагмента ЧСП конечного размера с учётом взаимной связи между элементами и влияния краевых участков.

II. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ

Крест можно рассматривать как дипольный ЧСП-резонатор. Для первой оценки резонансной частоты используется эффективная длина проводящего элемента.

$$L \approx 0.45 * (\Lambda_0/\sqrt{\varepsilon_{eff}}). \quad (1)$$

Эффективная диэлектрическая проницаемость для начальной оценки:

$$\varepsilon_{eff} \approx (1 + \varepsilon_r)/2. \quad (2)$$

При ε_r = 3.5 получаем $\varepsilon_{eff} \approx 2.25$, $\sqrt{\varepsilon_{eff}} \approx 1.5$.

Длина креста в миллиметрах может быть записана как:

$$L \approx 90/f_0, \quad (3)$$

Здесь f_0 задается в ГГц, а L является полной длиной креста от конца одного плеча до конца противоположного плеча.

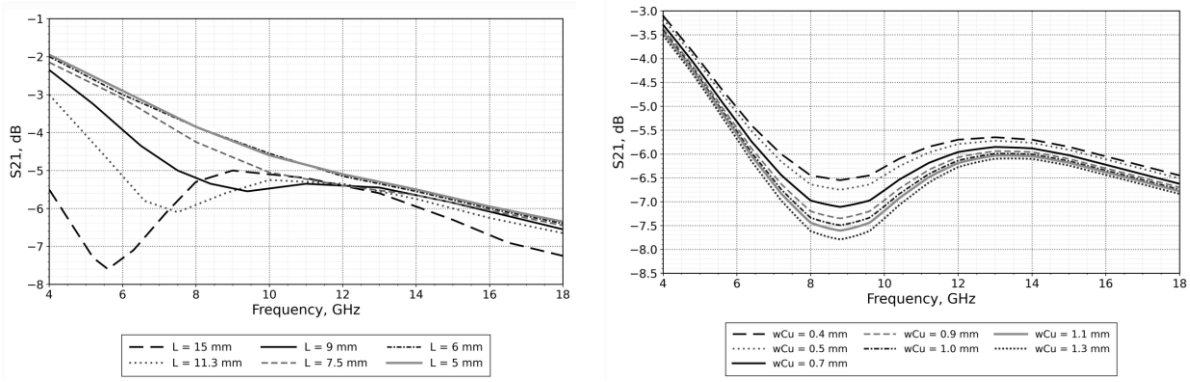
III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для электромагнитного моделирования исследуемой ЧСП параметры изменялись в диапазонах, приведенных в таблице 1.

Таблица 1. Параметры для моделирования

Целевой резонанс	*L*, мм	*w_Cu*, мм	*p*, мм
5.6 - 9.5 ГГц	15.0, 11.3, 9.0, 7.5, 6.0, 5.0	1.6	17.0
8.6 - 9 ГГц	9.0	0.4, 0.5, 0.7, 0.9, 1.0, 1.1, 1.3	10.5
8.5 - 9.4 ГГц	9.0	1.0	6, 7, 8, 9, 10, 12, 14

Результаты исследования зависимостей частотных характеристик S21(f) от геометрических параметров частотно-селективной поверхности приведены на рисунках 2-3.



а б

Рисунок 2. Результаты моделирования *S21: а* – для значений *L* от 5 до 15 мм; *б – для значений w_Cu* от 0,4 до 1,3 мм

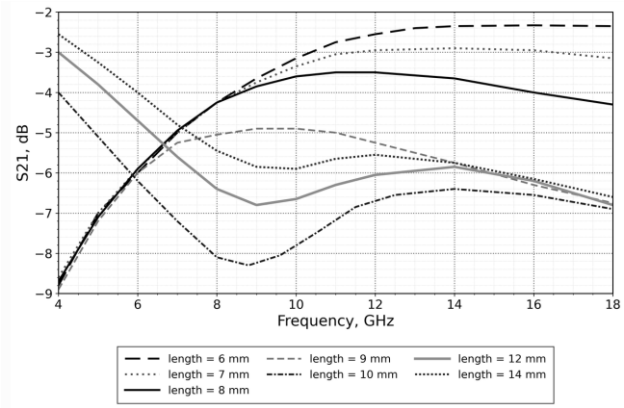


Рисунок 3. Результаты моделирования *S21* для различных значений *p*

Таблица 2. Влияние параметров ЧСП на частотные характеристики коэффициентов передачи и отражения

Исследуемый параметр	Диапазон изменения	Влияние
Длина креста *L*	5-15 мм	Увеличение *L* смещает резонанс *S21* вниз по частоте
Ширина полосы *w_Cu*	0.35-1.8 мм	Влияет на глубину и ширину резонанса
Период p	*L*+1 ... *L*+3 мм	Влияет на связь между ячейками и угловую устойчивость

В результате моделирования получены частотные зависимости *S21(f)* и *S11(f)* для базовой геометрии. Показано, что положение резонанса *S21* в большей степени определяется полной длиной креста *L*, его глубина и ширина зависят от ширины медной полосы *w_Cu* и периода решетки *p*. Увеличение длины медного креста приводит к снижению резонансной частоты. Ширина полосы и период решетки должны влиять на добротность, глубину провала *S21* и форму зависимости *S11*: рост *w_Cu* расширяет проводящий элемент и увеличивает связь с подложкой, а увеличение периода *p* ослабляет взаимную связь между соседними крестами и сужает резонансную область. Смоделированные значения резонансных частот соответствуют целевым диапазонам. При изменении длины креста L резонансные частоты находятся в области 5.6-9.5 ГГц, для ширины полосы w_Cu – в диапазоне 8.6-9.0 ГГц, а для периода решётки p –8.5-9.4 ГГц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Параметрическое моделирование ЧСП на основе медных крестов позволило определить связь между геометрией элементарной ячейки и частотными характеристиками поверхности, что может использоваться для выбора начальной геометрии резонансной ЧСП и разработки переключаемых метаповерхностей, а также для разработки переключаемых и реконфигурируемых метаповерхностей СВЧ-диапазона.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках задания 4.1.20 ГПНИ «Современное материаловедение, перспективные материалы и новые технологии».

ЛИТЕРАТУРА

[1] Costa, F. A Frequency Selective Radome with Wideband Absorbing Properties / F. Costa, A. Monorchio // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. — 2012. — Vol. 60, No. 6. — P. 2740–2747.

[2] An, Z. Frequency selective rasorber with high temperature resistance and mechanical bearing characteristics based on double-layer metasurface regulation / Z. An, T. Xu, Y. Li, R. Zhang, B. Zhang // Materials & Design. – 2025. – Vol. 254. – Art. no. 113991.

[3] Lv, J. Development of Energy-Selective Surface for Electromagnetic Protection / J. Lv, C. Luo, J. Zhao, H. Han, H. Lu, B. Zheng // Micromachines. – 2025. – Vol. 16, No. 5. – Art. no. 555. https://doi.org/10.3390/mi16050555.

[4] Anwar, R. S. Frequency Selective Surfaces: A Review / R. S. Anwar, L. Mao, H. Ning // Applied Sciences. – 2018. – Vol. 8, No. 9. – Art. no. 1689. https://doi.org/10.3390/app8091689.

DESIGN OF A FREQUENCY-SELECTIVE SURFACE FOR MICROWAVE ATTENUATION IN A SPECIFIED FREQUENCY BAND

L.I. Zaiko, N.V. Nasonova

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
ravenr.nosignall@gmail.com

Abstract: a frequency-selective surface based on a periodic array of copper cross-shaped elements printed on a dielectric substrate with ε_r = 3.5 and thickness of 1 mm is considered. Electromagnetic simulation of a 10×10 element fragment is performed in *CST Microwave Studio* under normal plane-wave incidence in the 4–18 GHz range. The influence of the cross length *L*, strip width *w_Cu*, lattice period p, and substrate thickness *h* on the frequency dependences of the transmission *S21* and reflection *S11* coefficients is studied. It is shown that increasing the cross length shifts the *S21* resonance to lower frequencies, while the strip width and period determine the *Q*-factor and the depth of the dip. The obtained dependences allow selecting the initial geometry of a resonant ЧСП and can be used in the development of switchable metasurfaces.

Keywords: frequency-selective surface, transmission coefficient, cross-shaped element, electromagnetic simulation.

UDC 004.056

SECURITY-BY-DESIGN PRINCIPLES FOR EMBEDDED AND IoT SYSTEMS

F. Badshahzoi, B.A. Mailykhanova

Kazakh National Agrarian Research University, Almaty, Kazakhstan, farhadbadshahzoi.uni@gmail.com

Abstract: this paper proposes a five-layer security-by-design model for embedded and Internet of Things systems and validates its structural coverage against selected requirements from NISTIR 8259A, NIST SP 800-213, and ETSI EN 303 645. The layers cover hardware trust, device integrity, identity and access, communication and data protection, and lifecycle security. A traceability assessment for a smart-agriculture IoT architecture maps ten security requirement groups to design layers and implementation controls. All selected requirement groups are addressed, while the assessment also identifies device identification, data protection, secure updates, state awareness, and recovery as controls that must span multiple system components.

Keywords: security-by-design, IoT security, embedded systems, secure boot, authentication, firmware security, cybersecurity.

I. INTRODUCTION

Embedded and Internet of Things (IoT) systems support agriculture, healthcare, transport, industrial automation, and smart buildings. Their connectivity enables continuous data collection and remote control but creates additional attack paths through devices, gateways, communication links, cloud services, and software-update channels. Resource constraints and long operational lifetimes further complicate the use of conventional security mechanisms.

Security-by-design integrates protection into requirements, architecture, implementation, deployment, and maintenance. NISTIR 8259A defines a core baseline of device cybersecurity capabilities [1], NIST SP 800-213 connects device capabilities with organizational security requirements [2], and ETSI EN 303 645 establishes baseline provisions for consumer IoT products [3]. These publications define what capabilities are expected, but a compact architectural view is still useful when students and system designers must place controls within a concrete embedded solution.

The objective of this work is to develop a five-layer model that translates established security requirements into architectural design decisions and to evaluate its traceability using a smart-agriculture IoT example. The contribution is not a new cryptographic algorithm; it is a reproducible mapping from requirement groups to security layers, components, and verifiable controls.

II. THREATS AND DESIGN REQUIREMENTS

Relevant threats include device impersonation, unauthorized access, interception and modification of data, extraction of credentials, execution of altered firmware, installation of malicious updates, and loss of security visibility after deployment. A single control cannot mitigate all these threats. For example, transport encryption protects data in transit but does not prove that a device is executing authorized firmware; authentication restricts access but does not provide a recovery path after compromise.

The requirement set used for the assessment was constructed from the device capabilities in NISTIR 8259A, system-level guidance in NIST SP 800-213, firmware resiliency guidance in NIST SP 800-193 [4], and relevant ETSI baseline provisions. Closely related provisions were consolidated into ten requirement groups to avoid counting repeated wording across standards. This consolidation supports traceability analysis; it does not claim formal product certification [5].

III. PROPOSED FIVE-LAYER MODEL

The model separates controls according to the trust dependency they establish. Layer 1 provides hardware-supported trust and protects key material. Layer 2 verifies software integrity during boot and supports recovery. Layer 3 controls device and user identities, authentication, and authorization. Layer 4 protects data and communications. Layer 5 maintains security through updates, monitoring, vulnerability management, and incident recovery. Higher layers depend on lower-layer trust, while monitoring and recovery interact with the entire lifecycle (Fig. 1).

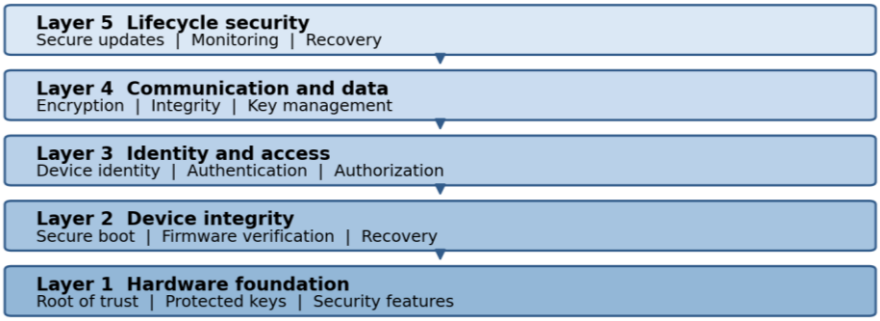


Figure 1. Five-layer security-by-design model

IV. TRACEABILITY ASSESSMENT

The model was applied to a smart-agriculture architecture containing soil and climate sensors, an IoT gateway, a cloud platform, and a management application. Each requirement group was mapped to a primary layer, a target component, and an observable implementation control. A requirement was counted as covered only when the model identified both its architectural location and a control that could be inspected or tested (Tab.1).

Table 1. Traceability of selected requirements to the proposed model

Requirement group	Layer	Target	Verifiable control
Device identification	3	Sensor, gateway	Unique device identifier
Authentication	3	All interfaces	Mutual authentication
Authorization	3	Gateway, cloud	Role-based access policy
Data confidentiality	4	Links, storage	Encryption enabled
Data integrity	4	Messages, logs	Integrity tag or signature
Software integrity	2	Sensor, gateway	Verified secure boot
Secure update	5	Sensor, gateway	Signed update accepted
Key protection	1	Device hardware	Protected key storage
Security state awareness	5	Gateway, cloud	Events and alerts recorded
Recovery and reset	2, 5	Device, operator	Trusted recovery procedure

All ten selected requirement groups were mapped to at least one layer and one observable control, giving structural coverage of 10/10 for the defined assessment set. Four groups require coordination across more than one component: authentication, confidentiality, integrity, and state awareness. Recovery spans Layers 2 and 5 because a trusted technical recovery mechanism must be accompanied by an operational response procedure. The result shows that the layered model is complete for the selected baseline, but it does not demonstrate resistance to every attack or replace platform-specific security testing.

The assessment also reveals a design distinction that is easy to miss in a flat checklist. Secure boot and protected key storage are device-local controls, whereas access policy, monitoring, and vulnerability response require gateway, cloud, and organizational participation. Therefore, assigning every requirement only to the sensor would leave system-level gaps even if the embedded firmware were correctly protected.

V. IMPLEMENTATION GUIDANCE

For implementation, each sensor should receive a unique identity during provisioning and authenticate before exchanging data with the gateway. Communication should use an appropriate secure protocol with managed keys. The gateway should enforce authorization, validate message integrity, record security-relevant events, and restrict administrative interfaces. Devices should verify firmware before execution and accept only authenticated updates. The cloud platform should protect stored data, manage privileges, support credential rotation, and retain monitoring information. Recovery procedures should define how compromised credentials are revoked and how a device returns to a trusted state.

Resource limitations require proportional controls. Hardware-backed key storage and secure boot are preferable where supported. On constrained devices, cryptographic algorithms, certificate profiles, logging volume, and update mechanisms must be selected according to memory, energy, bandwidth, and maintenance constraints. The traceability table can be used during design review: a missing target component or unverifiable control indicates that the corresponding requirement has not yet been translated into an implementable decision.

VI. THREAT-SCENARIO ANALYSIS

To examine how the layers cooperate, five representative attack scenarios were traced through prevention, detection, and recovery activities. The scenarios were selected because they affect different parts of the smart-agriculture architecture and cannot be addressed by a single mechanism. Table 2 records the principal layer interaction for each scenario. The entries describe expected security behaviour rather than measured attack success rates (Tab. 2).

Table 2. Layer interaction for representative attack scenarios

Attack scenario	Preventive control	Detection evidence	Recovery action
Cloned soil sensor	Unique identity and mutual authentication (L3)	Repeated identity or failed authentication alert (L5)	Revoke credential and reprovision device (L5)
Telemetry modification	Encryption and message-integrity protection (L4)	Integrity verification failure at gateway (L4, L5)	Reject message and rotate affected keys (L4, L5)
Altered firmware	Verified boot and protected trust anchor (L1, L2)	Boot verification failure (L2)	Load trusted recovery image (L2)
Malicious update	Signed update package and rollback protection (L2, L5)	Invalid signature or version event (L5)	Block update and retain approved version (L2, L5)
Compromised cloud account	Role-based access and strong authentication (L3)	Abnormal login or privilege-use alert (L5)	Disable account, revoke sessions, review logs (L5)

The scenario analysis demonstrates three recurring dependencies. First, identity mechanisms require lifecycle support: a unique credential is useful only if it can be revoked, replaced, and audited. Second, integrity must be checked at more than one boundary. Firmware verification protects execution on the device, whereas message verification protects data exchanged with the gateway and cloud. Third, recovery must preserve trust. Restoring an unverified image or reusing a compromised credential could return the system to operation without removing the original weakness.

For design review, the combined results of Tables 1 and 2 provide two complementary checks. The traceability matrix verifies that each selected requirement has an architectural location and observable control. The scenario matrix verifies that controls cooperate across the sequence of prevention, detection, containment, and recovery. A design fails the review when a requirement has no owner, when an event cannot be observed, or when no trusted recovery action is defined. This rule makes the model usable as a compact checklist before implementation and as a basis for later security testing.

The proposed layers also clarify the different roles of the reference documents. NISTIR 8259A is centred on technical capabilities that an IoT device should provide or support, including identification, configuration, data protection, interface restriction, software update, and awareness of cybersecurity state. NIST SP 800-213 places these capabilities in an organizational risk-management context and helps a purchaser express device requirements. ETSI EN 303 645 adds product-oriented provisions such as avoiding universal default passwords, maintaining update mechanisms, protecting sensitive parameters, minimizing exposed attack surfaces, and supporting secure deletion. The layered model does not replace these sources; it provides a common architectural index through which their provisions can be assigned to components.

This distinction is important in the smart-agriculture example. The sensor manufacturer is responsible for hardware trust, firmware verification, protected credentials, and update support. The system integrator configures identities, communication protection, gateway filtering, and cloud permissions. The operator monitors events, manages credentials, applies updates, and executes recovery procedures. If responsibility is not assigned, a technically available capability may remain disabled or unmanaged. Accordingly, the design-

review record should identify a responsible role, evidence source, and verification method for every row of the traceability matrix.

The verification method can be refined during implementation. Device identity can be checked by attempting enrollment with duplicated credentials; communication protection can be reviewed through protocol configuration and packet inspection; secure boot can be tested with an altered firmware image in a controlled environment; update protection can be checked using an unsigned package; and security-state awareness can be assessed by confirming that failed authentication, integrity errors, and update failures generate timestamped events. Recovery should be tested only on a non-production device using an approved image and documented credential-revocation procedure. These tests would convert structural coverage into measurable implementation evidence.

The analysis has limitations. The ten requirement groups are a consolidated educational baseline and do not reproduce every provision of the cited standards. Structural coverage shows completeness of the mapping, not resistance to real adversaries. Hardware platform, protocol, cryptographic configuration, and operational environment can change the effectiveness and resource cost of each control. These factors should be evaluated experimentally when a target device and software stack are selected.

VII. CONCLUSION

A five-layer security-by-design model was developed for embedded and IoT systems. The model organizes hardware trust, device integrity, identity and access, communication and data protection, and lifecycle security into dependent architectural layers. A traceability assessment for a smart-agriculture IoT architecture mapped ten requirement groups derived from NIST and ETSI guidance to system components and verifiable controls. All ten groups were structurally covered, while the analysis identified several controls that must span the device, gateway, cloud platform, and operational process. The model can support early design reviews and teaching activities. Future work should implement the controls on a selected IoT platform and measure security effectiveness, latency, memory use, and energy overhead.

REFERENCES

[1] Fagan M., Megas K. N., Scarfone K., Smith M. IoT Device Cybersecurity Capability Core Baseline. NISTIR 8259A. National Institute of Standards and Technology, 2020. DOI: 10.6028/NIST.IR.8259A.

[2] Fagan M., Marron J., Brady K., Cuthill B., Megas K., Herold R., Lemire D., Hoehn B. IoT Device Cybersecurity Guidance for the Federal Government: Establishing IoT Device Cybersecurity Requirements. NIST SP 800-213. National Institute of Standards and Technology, 2021. DOI: 10.6028/NIST.SP.800-213.

[3] ETSI. Cyber Security for Consumer Internet of Things: Baseline Requirements. ETSI EN 303 645 V3.1.2, 2024.

[4] Regenscheid A. Platform Firmware Resiliency Guidelines. NIST SP 800-193. National Institute of Standards and Technology, 2018. DOI: 10.6028/NIST.SP.800-193.

[5] Schiller E., Aidoo A., Fuhrer J., Stahl J., Ziörjen M., Stiller B. Landscape of IoT Security // Computer Science Review. 2022. Vol. 44. Art. 100467. DOI: 10.1016/j.cosrev.2022.100467.

ПРИНЦИПЫ БЕЗОПАСНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВСТРОЕННЫХ И IoT-СИСТЕМ

Бадшахзои Ф., Майлыханова Б. А.

Казахский национальный аграрный исследовательский университет, Алматы, Казахстан,
farhadbadshahzoi.uni@gmail.com

Аннотация: предложена пятиуровневая модель безопасного проектирования встроенных систем и Интернета вещей и выполнена проверка структурного покрытия требований NISTIR 8259A, NIST SP 800-213 и ETSI EN 303 645. Модель включает аппаратную основу доверия, целостность устройства, управление идентификацией и доступом, защиту связи и данных, а также безопасность жизненного цикла. Для архитектуры умного сельского хозяйства десять групп требований сопоставлены уровням, компонентам и проверяемым механизмам защиты. Все выбранные группы требований получили архитектурное соответствие; при этом показано, что ряд механизмов должен охватывать устройство, шлюз, облачную платформу и эксплуатационные процессы.

Ключевые слова: безопасное проектирование, безопасность IoT, встроенные системы, безопасная загрузка, аутентификация, безопасность прошивки, кибербезопасность.

УДК 621.375.026

ВЛИЯНИЕ ТОПОЛОГИИ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ: АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Матёкубов У.К.[1], Мурадов М.М.[1], Улашов С.Р.[2]

[1]Ургенчский государственный университет имени Абу Райхана Беруни, Ургенч, Узбекистан

[2]Ассоциация "Узэлтехсаноат", Ташкент, Узбекистан, sr.ulashov@gmail.com

Аннотация: высокочастотный усилитель мощности определяет энергопотребление и качество передачи базовых станций мобильной связи, а его устойчивость и энергоэффективность зависят от топологии электронной схемы и параметров элементов. Проанализированы составные части схемы (активный прибор, согласующие цепи, цепи смещения, стабилизации и обратной связи), топологии (однотактная, каскодная, двухтактная, балансная) и архитектуры повышения эффективности (Доэрти, слежение за огибающей, Шире, F-класс); обобщено влияние топологических признаков на показатели качества. Установлено, что существующие подходы не описывают топологию в целостном параметризованном виде и не учитывают неопределённость параметров элементов на схемном уровне, что обусловливает необходимость формального (топологического) описания и интервальных методов оценки.

Ключевые слова: высокочастотный усилитель; топология схемы; устойчивость; энергоэффективность; GaN HEMT; усилитель Доэрти; чувствительность; неопределённость.

I. ВВЕДЕНИЕ

Энергопотребление и качество сигнала базовой станции (БС) мобильной связи в значительной степени определяются высокочастотным усилителем мощности: модель мощности БС связывает радиочастотную мощность на антенне с полной потребляемой мощностью станции, и усилитель является одним из ключевых звеньев этой цепи [1]. В системах 5G высокие частоты, широкая полоса канала и сигналы с большим пик-фактором (PAPR) требуют от усилителя одновременно высокой эффективности, линейности и устойчивости [2, 3]. Показатели усилителя определяются не только технологией активного прибора, но и топологией схемы – согласующими цепями, цепями смещения, стабилизации и обратной связи и порядком их соединения, однако в литературе топологии, как правило, рассматриваются по отдельности. Цель работы – проанализировать влияние составных частей и топологических признаков схемы усилителя на устойчивость и энергоэффективность и на этой основе выявить научные пробелы.

II. АНАЛИЗ СХЕМОТЕХНИКИ УСИЛИТЕЛЕЙ

a. Составные части схемы и активные приборы

Схема высокочастотного усилителя состоит из нескольких функциональных цепей: активного прибора (транзистора), входной и выходной согласующих цепей, цепи смещения (задания рабочей точки), а также цепей стабилизации и обратной связи [2]. На высоких частотах на поведение схемы влияют паразитные индуктивности и ёмкости проводников, контактов и корпуса, поэтому при анализе применяются подход с распределёнными параметрами и матрица рассеяния (S-параметры) [4]. В качестве активного прибора в усилителях БС традиционно используется LDMOS-транзистор, а для 5G – GaN HEMT благодаря высокой удельной мощности, высокому рабочему напряжению и широкополосности [5]. Малосигнальная эквивалентная схема полевого транзистора описывается крутизной g_m, ёмкостями C_{gs}, C_{gd}, C_{ds} и выходным сопротивлением r_{ds}. Ёмкость затвор–сток C_{gd} влияет на вход через эффект Миллера: коэффициент усиления по напряжению и входная ёмкость определяются выражениями [4]:

$$A_v = -g_m(r_{ds} \parallel R_L), \tag{1}$$

$$C_{in} = C_{gs} + (1 + |A_v|)C_{gd}. \tag{2}$$

Из (2) видно, что влияние C_{gd} пропорционально усилению: она увеличивает входную ёмкость, ограничивает полосу и, создавая обратную связь между входом и выходом, влияет на устойчивость. В каскодной топологии усиление первого транзистора близко к единице, поэтому эффект Миллера ослабляется (рис. 1, а). В режиме большого сигнала нелинейность описывают эмпирические модели, например модель Ангелова (Chalmers): они позволяют прогнозировать AM–AM- и AM–PM-

характеристики, гармонические и интермодуляционные искажения, но требуют экстракции множества параметров для каждого прибора [6].

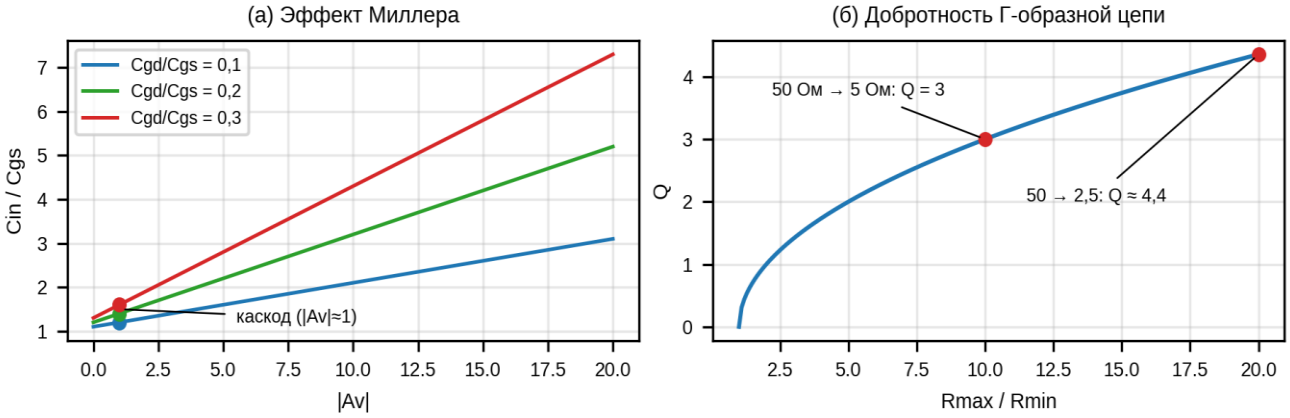


Рисунок 1. Расчёты на схемном уровне: (а) эффект Миллера – зависимость входной ёмкости от усиления (кружки – каскод); (б) добротность Г-образной согласующей цепи

б. Согласующие цепи, цепи смещения и стабилизации, топологии

Согласующие цепи приводят сопротивления источника и нагрузки к оптимальным для активного прибора значениям. Добротность Г-образной цепи определяется отношением согласуемых сопротивлений (R_{max}, R_{min} — большее и меньшее сопротивления):

$$Q = \sqrt{\frac{R_{max}}{R_{min}} - 1}. \quad (3)$$

Чем больше Q, тем уже полоса [4]; например, при согласовании 50 Ом с 5 Ом Q = 3, с 2,5 Ом — $Q \approx 4{,}4$ (рис. 1, б). Цепь смещения задаёт рабочую точку и класс усилителя (A, AB, B, C): приближение напряжения на затворе к напряжению отсечки уменьшает угол отсечки и повышает эффективность, но ухудшает линейность [2, 3]. В линейном приближении устойчивость оценивается критериями Роллетта (K) и Эдвардса–Синского (μ) [4, 7]; при большом сигнале возможны дополнительные параметрические колебания, поэтому необходим нелинейный анализ устойчивости [8]. Стабилизация (резистор, вырождение в цепи истока, частотно-зависимые цепи) обычно несколько снижает усиление и эффективность; отрицательная обратная связь ($A_f = A/(1 + \beta A)$) улучшает линейность и полосу, но уменьшает усиление. Однотактная топология проста, но ограничена по мощности и линейности; каскодная ослабляет эффект Миллера, повышая устойчивость и усиление, но требует повышенного напряжения питания; двухтактная подавляет чётные гармоники, но требует балунов; балансная обеспечивает хорошее согласование, устойчивость и резервирование, но требует вдвое большего числа элементов [2].

в. Архитектуры повышения эффективности

Для повышения средней эффективности при сигналах с большим PAPR применяются архитектуры Доэрти, слежения за огибающей (ET), Шире (outphasing) и гармоническая терминация классов F/F^{-1} [3]. Усилитель Доэрти предложен в 1936 г. [9] и остаётся одним из наиболее распространённых решений в современных сотовых БС [10]; в нём нагрузка основного усилителя модулируется током пикового усилителя:

$$R_{\text{осн}} = R_{opt}\left(1 + \frac{I_{\text{пик}}}{I_{\text{осн}}}\right). \quad (4)$$

Полоса классической схемы ограничена узкополосными λ/4-линиями [10]. GaN MMIC-усилитель Доэрти в полосе 4,1–5,6 ГГц показал КПД по стоку 38,5–46,5 % при отступлении на 6 дБ (back-off) [11]. При сравнении усилителей Доэрти и outphasing на GaN-on-Si outphasing превосходил по максимальному КПД по добавленной мощности (PAE) (58,3 % и 44,2 %), а усилитель Доэрти — по линейности и эффективности при отступлении 7,5 дБ (38,5 % и 26,1 %) [12]. Основные проблемы архитектуры Доэрти — линейность, эффективность в режиме back-off, полоса и тепловой режим [13]. В целом все архитектуры вносят дополнительные топологические элементы и усложняют настройку (табл. 1).

Таблица 1. Сравнительный анализ архитектур повышения эффективности

Архитектура	Принцип повышения эффективности	Полоса / сложность	Основное ограничение
Доэрти	Модуляция нагрузки	Средняя / средняя	Узкая полоса (λ/4-линии), требования к линеаризации [10, 12]
Слежение за огибающей (ET)	Адаптация питания по огибающей	Широкая / высокая	Нужен быстрый модулятор огибающей [3]
Шире (outphasing)	Разделение по фазе	Средняя / высокая	Сложность сумматора и настройки; в back-off эффективность ниже, чем у Доэрти [12]
Классы F / F^{-1}	Гармоническая терминация	Узкая / средняя	Точность гармонических цепей [3]

г. Паразитные элементы, тепловые эффекты и неопределённость

В MMIC-исполнении необходим точный учёт распределённых элементов и паразитных связей. Индуктивности выводов и ёмкости контактов снижают эффективную частоту среза; например, паразитная индуктивность истока создаёт отрицательную обратную связь и уменьшает усиление [4]. В мощном усилителе существует обратная связь между температурой кристалла и g_m: рост температуры снижает g_m и усиление, что изменяет рассеиваемую мощность; поэтому применяются теплораспределители, тепловые переходные отверстия и подложки с высокой теплопроводностью (GaN-on-SiC) [5]. В результате разброс параметров элементов, рабочей точки и температуры приводит к отклонению устойчивости и эффективности от номинальных значений. Чувствительность этого отклонения к параметру x_i определяется как относительное изменение:

$$S_{x_i}^{y} = \frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{y}, \tag{5}$$

где y – показатель (запас устойчивости или эффективность).

При традиционном проектировании разброс оценивают методом Монте-Карло; он требует большого числа расчётов и не даёт гарантированных (наихудших) границ. Робастные подходы на основе множества Парето, учитывающие неопределённость параметров, в последние годы предлагаются для выбора размеров GaN HEMT [14]. Средства EDA (S-параметры, гармонический баланс, электромагнитное моделирование, load-pull) обеспечивают высокую точность, но ресурсоёмки и не дают прозрачного аналитического выражения, связывающего топологию с показателями [2, 8]. Влияние топологических признаков на показатели качества обобщено в табл. 2.

Таблица 2. Влияние топологических признаков на показатели качества усилителя

Топологический признак	Влияющий показатель	Механизм влияния
Тип и размер активного прибора	Мощность, f_T/f_{max}, эффективность	Крутизна и ёмкости
Каскодное включение	Устойчивость, усиление	Ослабление эффекта Миллера (C_{gd})
Согласующая цепь (Q)	Полоса, эффективность, согласование	Трансформация импеданса
Смещение (рабочая точка)	Эффективность, линейность	Угол отсечки
Модуляция нагрузки (Доэрти)	Эффективность в back-off	Динамическое изменение нагрузки
Паразитные элементы	Частота среза, усиление, устойчивость	Индуктивность выводов и ёмкость

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ показал: (1) каждый показатель качества усилителя связан с одним или несколькими топологическими признаками (табл. 2), и эти связи количественно выражаются через параметры элементов; (2) различные топологии и архитектуры предлагают разный компромисс между устойчивостью и эффективностью, но единого параметризованного описания, связывающего их топологические признаки с показателями качества, не существует; (3) паразитные элементы, смещение рабочей точки, нагрев и технологический разброс порождают неопределённость, системный учёт

которой на схемном уровне развит недостаточно: метод Монте-Карло не даёт гарантированных границ, а средства EDA ресурсоёмки. Поэтому перспективным направлением является формальное (топологическое) описание схемы усилителя, расчёт функций чувствительности и интервальная оценка устойчивости и эффективности.

ЛИТЕРАТУРА

[1] How much energy is needed to run a wireless network? / G. Auer [et al.] // IEEE Wireless Communications. 2011. Vol. 18, No 5. P. 40–49. https://doi.org/10.1109/MWC.2011.6056691.

[2] Cripps, S. C. RF Power Amplifiers for Wireless Communications / S. C. Cripps. 2nd ed. Boston – London: Artech House, 2006.

[3] Power amplifiers and transmitters for RF and microwave / F. H. Raab [et al.] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2002. Vol. 50, No 3. P. 814–826.

[4] Pozar, D. M. Microwave Engineering / D. M. Pozar. 4th ed. Hoboken: Wiley, 2012.

[5] GaN-based RF power devices and amplifiers / U. K. Mishra [et al.] // Proceedings of the IEEE. 2008. Vol. 96, No 2. P. 287–305.

[6] A new empirical nonlinear model for HEMT and MESFET devices / I. Angelov, H. Zirath, N. Rorsman // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1992. Vol. 40, No 12. P. 2258–2266.

[7] A new criterion for linear 2-port stability using a single geometrically derived parameter / M. L. Edwards, J. H. Sinsky // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1992. Vol. 40, No 12. P. 2303–2311.

[8] Suárez, A. Analysis and Design of Autonomous Microwave Circuits / A. Suárez. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2009.

[9] Doherty, W. H. A new high efficiency power amplifier for modulated waves // Proceedings of the IRE. 1936. Vol. 24, No 9. P. 1163–1182.

[10] Breaking the bandwidth limit: A review of broadband Doherty power amplifier design for 5G / G. Nikandish, R. B. Staszewski, A. Zhu // IEEE Microwave Magazine. 2020. Vol. 21, No 4. P. 57–75.

[11] Broadband GaN MMIC Doherty power amplifier using continuous-mode combining for 5G sub-6 GHz applications / J. Pang [et al.] // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2022. Vol. 57. P. 2143–2154.

[12] A Comparative Analysis of Doherty and Outphasing MMIC GaN Power Amplifiers for 5G Applications / V. Díez-Acereda [et al.] // Micromachines. 2023. Vol. 14, No 6. Art. 1205. https://doi.org/10.3390/mi14061205.

[13] Advanced Doherty Power Amplifier Architectures for 5G Handset Applications: A Comprehensive Review of Linearity, Back-Off Efficiency, Bandwidth, and Thermal Management / S. He, H. Chen // Chips. 2025. Vol. 4, No 2. Art. 20. https://doi.org/10.3390/chips4020020.

[14] Robust Pareto Transistor Sizing of GaN HEMTs for Millimeter-Wave Applications / R. Perez Martinez, S. Boyd, S. Chowdhury // IEEE Access. 2025. Vol. 13. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3543787.

INFLUENCE OF HIGH-FREQUENCY AMPLIFIER CIRCUIT TOPOLOGY ON STABILITY AND ENERGY EFFICIENCY IN MOBILE COMMUNICATION SYSTEMS: AN ANALYTICAL REVIEW

U.K. Matyokubov[1], M.M. Muradov[1], S.R. Ulashov[2]

[1]Urgench State University named after Abu Rayhan Biruni, Urgench, Uzbekistan

[2]"Uzeltekhsanoat" Association, Tashkent, Uzbekistan, sr.ulashov@gmail.com

Abstract: the high-frequency power amplifier largely determines the energy consumption and transmission quality of mobile base stations, and its stability and efficiency depend on the circuit topology and the parameters of its elements. The paper analyses the components of the amplifier circuit (active device, matching, bias, stabilisation and feedback networks), circuit topologies (single-ended, cascode, push-pull, balanced) and efficiency-enhancement architectures (Doherty, envelope tracking, Chireix, class-F) and generalises the influence of topological features on quality indicators. Existing approaches are shown not to describe topology in a holistic parametrised form and not to account systematically for the uncertainty of element parameters at circuit level, which calls for formal (topological) circuit description and interval assessment methods.

Keywords: high-frequency amplifier; circuit topology; stability; energy efficiency; GaN HEMT; Doherty amplifier; sensitivity; uncertainty.

УДК 615.47 + 004.33

АППАРАТНО-ПРОГРАММНАЯ ПЛАТФОРМА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ИМПЛАНТИРУЕМЫХ СЕНСОРОВ

Осипов А.Н.[1], Урбанович С.П.[1], Мороз С.А.[2], Ронишенко Б.В.[3]

[1]Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, osipov@bsuir.by

[2]Производственное унитарное предприятие «ФреБор», Борисов, Республика Беларусь

[3]Институт физико-органической химии НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Аннотация**:** в работе рассматриваются вопросы разработки программно-аппаратной платформы для диагностических имплантируемых сенсоров (ДИС). Описан прототип системы непрерывного мониторинга глюкозы (НМГ), созданный на базе оптического метода. Приведена структурная схема системы, включающей имплантируемый сенсор, трансмиттер и мобильное приложение. Детально рассмотрена архитектура платформы ДИС, использующей технологии RFID/NFC, Energy Harvesting и микропотребляющие СБИС. Описаны принципы работы сенсора, включая цикл заряда, измерения и передачи данных, а также используемый чувствительный элемент на основе индикаторного геля. Обоснован выбор элементной базы (STMicroelectronics) и показаны преимущества разработанной платформы: малые габаритные размеры, безбатарейное питание, поддержка протокола ISO/IEC 15693, режимы самодиагностики, что позволяет использовать разработанную для создания широкого спектра интеллектуальных имплантируемых медицинских изделий.

Ключевые слова: имплантируемые электронные приборы, диагностические имплантируемые сенсоры, непрерывный мониторинг глюкозы, биомедицинские измерения.

I. ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития медицинского приборостроения характеризуется прорывным внедрением нового перспективного направления, связанного с разработкой и применением имплантируемых электронных приборов (ИЭП) [1-2]. Их использование в практическом здравоохранении позволяет решать широкий круг задач, связанных с мониторингом физиологических процессов и стимуляцией функционирования органов и систем человека: мониторинг уровня глюкозы, артериального давления и сердечного ритма, стимуляция сердечно-сосудистой системы и другое. Применение имплантируемых приборов обеспечивает улучшение качества и продолжительности жизни. Ведущие мировые лаборатории (MIT, Caltech, а также стартапы) активно тестируют новые типы ИЭП. В настоящее время сектор основных производителей чипов для ИЭП невелик: TDK Corporation (через ICsense), Renesas, Microchip, ams-OSRAM, ON Semiconductor (onsemi), NXP, IC'Alps, Cirtec Medical, Microful AG, Cyient Limited, Presto Engineering, Cochlear, Biotronik, Cirtec Medical, ST, NTLab. Однако среди выпускаемых чипов существуют подходящие для решения вышеупомянутых задач. При проектировании ИЭП разработчики сталкиваются с проблемами, решение которых лежит на стыке микроэлектроники, радиотехники, медицины и материаловедения: беспроводное питание, обеспечение биосовместимости, радиочастотная передача данных в биологической среде, калибровка и функциональный контроль функциональных блоков, микроминиатюризация. В данном докладе рассматриваются вопросы разработки аппаратно-программной платформы для диагностических имплантируемых сенсоров (ДИС), т.е. приборов, предназначенных для мониторинга параметров организма на организм.

II. СТРУКТУРА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАТФОРМЫ

В Центре междисциплинарных исследований БГУИР реализован проект по разработке прототипа системы непрерывного мониторинга глюкозы (НМГ), основанного на оптическом методе. Разработка ИЭП, помимо требований к надёжности выполнения основного функционала, связана с рядом ключевых проблем: достижение сверхмалых габаритных размеров при заданной механической прочности, обеспечение биосовместимости, сверхнизкое энергопотребление, беспроводная передача данных и энергопитание, самотестирование и автокалибровка. Для их решения авторами проекта использованы следующие технологии: RFID/NFC, Energy Harvesting, микропотребление СБИС, энергоэффективные режимы работы. Результаты, полученные при разработке НМГ, являются основой создания универсальной программно-аппаратной платформы ДИС. Структурная схема разработанной системы НМГ приведена на рисунке 1. ДИС устанавливается в организм человека в районе плеча на глубину до 20 мм. Над имплантом размещается трансмиттер (крепится к телу пациента). ДИС регистрирует показания глюкозы во внеклеточной жидкости с заданным периодом либо по запросу и

передаёт эту информацию на трансмиттер по протоколу NFC ISO/IEC 15693 (рекомендован для имплантируемых электронных приборов [3]).

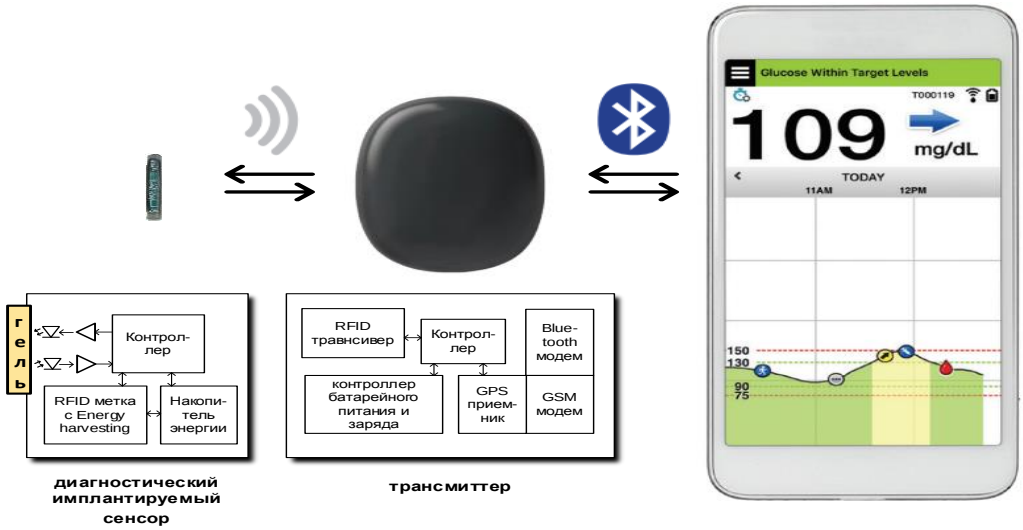


Рисунок 1. Структурная схема системы НМГ

Трансмиттер формирует электромагнитное поле, которое наводит ЭДС в катушке ДИС, достаточное для его питания. Принятые от сенсора данные передаются трансмиттером по Bluetooth на мобильный телефон, где они отображаются и накапливаются в базе данных. Трансмиттер герметичен, встроенный аккумулятор обеспечивает работу трансмиттера и питание имплантируемого сенсора без подзарядки в течение суток или более. Структурная схема платформы для разработанного ДИС представлена на рисунке 2.

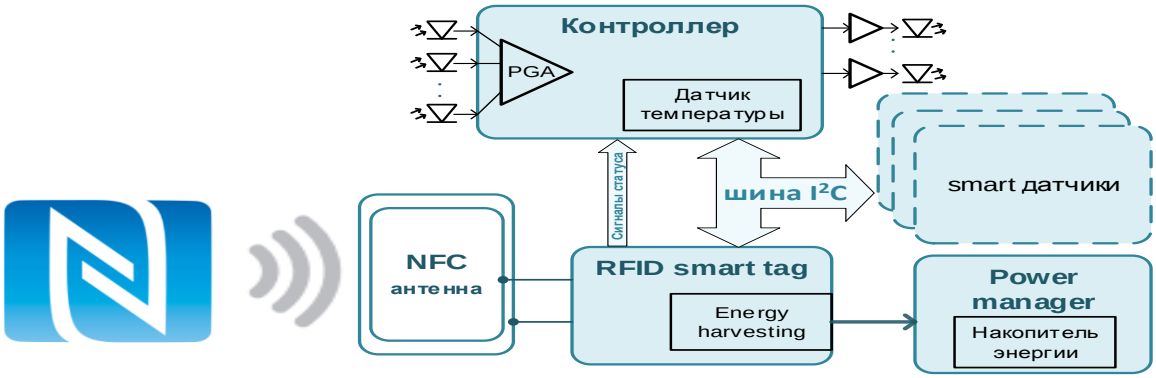


Рисунок 2. Структурная схема платформы ДИС системы НМГ

Радиометка RFID smart tag содержит в себе схему сбора электромагнитной энергии Energy harvesting, что позволяет использовать один чип одновременно для идентификации, обмена данными и питания ДИС. На выходе схемы Energy harvesting нестабилизированное питание преобразуется до нужного уровня в блоке вторичного питания (Power manager) и заряжает внутренний конденсатор (накопитель). Заряд накопителя производится в течение нескольких сотен миллисекунд, профиль заряда контролируется контроллером. По окончании заряда накопителя включается схема питания измерительного оборудования (фотодиоды, фотоусилитель, ультрафиолетовые светодиоды и др.) и производится цикл измерений уровня глюкозы. По завершении цикла измерений питание измерительного оборудования выключается, контроллер импланта обрабатывает измеренные данные, оценивает их достоверность и передаёт посредством радиометки трансмиттеру. Таким образом, рабочий цикл ДИС завершается, и он переходит в режим сна либо деактивируется.

В качестве чувствительного к глюкозе элемента использован специально разработанный индикаторный гель. Флюоресценция геля при облучении его УФ излучением светодиода изменяется пропорционально концентрации глюкозы во внеклеточной жидкости. Эксперименты по имплантации образцов гелей в крыс сроком на 21 день показали их высокую устойчивость к механическому разрушению и хорошую биосовместимость. Наличие воспалительных процессов в период после имплантации, сопровождающихся образованием пероксида водорода и других активных форм

кислорода [4]. приводило к постепенному снижению интенсивности люминесценции. Для решения данной проблемы апробированы три основных подхода: введение в состав геля ферментов каталазы и супероксиддисмутазы для удаления пероксида водорода и супероксид-аниона [4]; добавление жертвенной бороновой кислоты, которая будет преимущественно взаимодействовать с активными формами кислорода, снижая окислительную нагрузку на индикаторный краситель [5]; и снижение выраженности воспалительной реакции за счёт введения дексаметазона [6].

Программное обеспечение для ДИС и трансмиттера разработано на языке C++ в среде STM32CubeIDE. Программное обеспечение для мобильного телефона написано на языке Kotlin в среде Android Studio. Программное обеспечение содержит модули: инициализации, тестирование аппаратуры, измерений, обмена данными с радиометкой. Внешний вид имплантируемого сенсора представлен на рисунке 3.

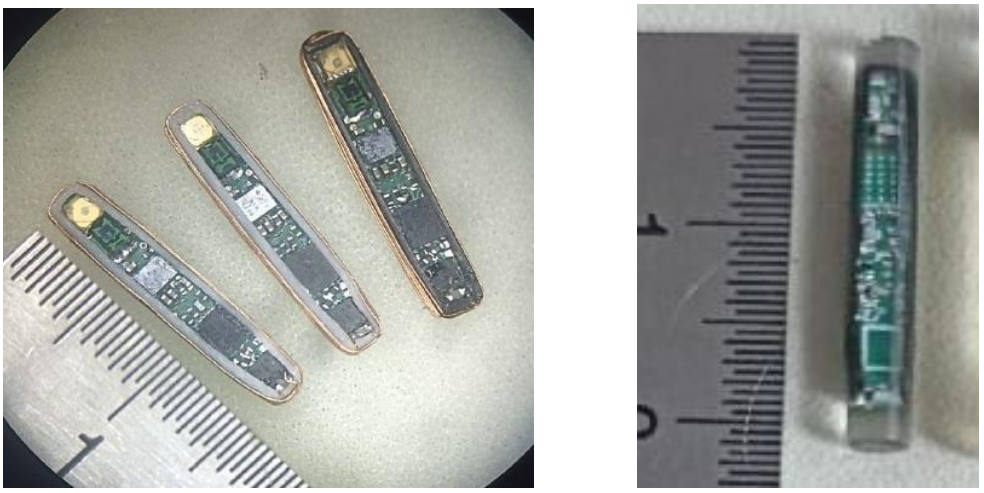


Рисунок 3. Внешний вид ДИС системы НМГ. Слева — вид ДИС без корпуса с установленной антенной и оптической системой, справа — вид ДИС, помещённого в герметичный корпус

Габариты печатной платы ДИС - 2.68мм х 16мм, габариты устройства в корпусе – ⌀3.5мм х 19мм.

Выбор элементной базы ДИС был основан на критериях стоимости, производительности, габаритов корпусов чипов, энергоэффективности и соответствии медицинским стандартам [7]. В качестве комплекта чипов для разрабатываемого ДИС выбран комплект от компании STMicroelectronics [8].

Первоначально ДИС разрабатывался для системы НМГ в соответствии с проектом НМГ. Однако заложенные в структуру схемные и технологические решения, большой набор периферии контроллера, универсальность комплекта и расширенные возможности схемы питания позволили создать гибкую платформу для решения гораздо большего круга задач, Так, производитель выпускает интеллектуальные датчики, совместимые с выбранным комплектом: трёхкоординатный MEMS-акселерометр MIS2DU12 (размер корпуса 2,0 мм × 2,0 мм × 0,74 мм), ST1VAFE3BX — канал регистрации биопотенциалов (vAFE) со встроенным ИИ-ядром (размер корпуса 2,0 мм × 2,0 мм × 0,74 мм; поддерживает следующие типы биосигналов: ЭКГ — электрическая активность сердца, ЭЭГ — электрическая активность мозга, ЭМГ — электрическая активность мышц, ЭНГ — измерение нервных импульсов, СКГ — вибрации сердца, измеряемые на грудной клетке), которые легко встраиваются в платформу.

Разработанная платформа имеет следующие важные преимущества: конструкция антенны практически не увеличивает размеров имплантируемого сенсора; за счет удачного подбора корпусов чипов и удачной их трассировки удалось достичь диаметра капсулы импланта 3.5 мм; используется безбатарейное питание и обмен данными в соответствии с ISO/IEC 15693 – наиболее перспективным протоколом для ДИС на сегодняшний день; цифровая платформа обеспечивает в полной мере возможности самодиагностики, автокалибровки, программирования, интеллектуального контроля заряда накопителя и цикла измерений.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена программно-аппаратная платформа диагностических имплантируемых сенсоров, реализованная на базе электронных приборов компании STMicroelectronics с использованием технологий RFID/NFC, Energy Harvesting и микропотребляющих СБИС. Она характеризуется малыми габаритами, низким энергопотребление, гибким программным обеспечением и осуществляет

регистрацию биосигналов, беспроводною зарядку энергией, радиочастотный обмен данными в биологической среде, калибровку и функциональный контроль блоков. Таким образом, разработанная платформа благодаря модульности аппаратной части и программного обеспечения может быть использована при проектировании интеллектуальных устройств, решающих широкий круг задач мониторинга физиологического состояния человека: сердечного ритма, гемодинамики, частоты дыхания и др.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Ермишкин В.В., Лукошкова Е.В., Капелько В.И., Килимник В.А. Перспективы применения имплантируемых микроэлектромеханических систем для мониторинга и анализа параметров системы кровообращения // Медицинская техника. 2015. № 2. С. 1-4.

[2] Технологические тренды в области имплантируемой и носимой электроники и модификаций возможностей человека. Т. 4 : доклад «Глобальный ландшафт исследований и перспективных разработок в области укрепления человека» / научный редактор И.А. Иванов. – Москва : Эгитас, 2022.

[3] Continuous operation of battery-free implants enables advanced fracture recovery monitoring / K. A. Khan, G. F. Roy, D. L. Pederson [et al.] // Science Advances. — 2025. — Vol. 11, № 19. — Art. eadt7488. — URL: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12063648/

[4] Sawayama J., Okitsu T., Nakamata A., Kawahara Y., Takeuchi S. Hydrogel Glucose Sensor with In Vivo Stable Fluorescence Intensity Relying on Antioxidant Enzymes for Continuous Glucose Monitoring // iScience. — 2020. — Vol. 23, No. 6. — Art. 101243. — DOI: 10.1016/j.isci.2020.101243.

[5] Garg S. K., Liljenquist D., Bode B., Christiansen M. P., Bailey T. S., Brazg R. L., Denham D. S., Chang A. R., Akturk H. K., Dehennis A., Tweden K. S., Kaufman F. R. Evaluation of Accuracy and Safety of the Next-Generation Up to 180-Day Long-Term Implantable Eversense Continuous Glucose Monitoring System: The PROMISE Study // Diabetes Technology & Therapeutics. — 2022. — Vol. 24, No. 2. — P. 84–92. — DOI: 10.1089/dia.2021.0182.

[6] Klueh U., Kaur M., Montrose D. C., Kreutzer D. L. Inflammation and Glucose Sensors: Use of Dexamethasone to Extend Glucose Sensor Function and Life Span in Vivo // Journal of Diabetes Science and Technology. — 2007. — Vol. 1, No. 4. — P. 496–504.

[7] Kang Y. C., Song H. J. Near-Field Communication in Biomedical Applications // Sensors. 2021. Vol. 21, no. 3. Art. 703. DOI: 10.3390/s21030703.

[8] How NFC can help pharmaceutical brands ensure patient safety [Электронный ресурс] // STMicroelectronics. — Электрон. дан. — [Б. м.], [2021?]. — URL: https://www.st.com/content/st_com/en/campaigns/nfc-for-pharma.html

HARDWARE-SOFTWARE PLATFORM FOR IMPLANTABLE DIAGNOSTIC SENSORS

A. Osipov[1], S. Urbanovich[1], S. Moroz[2], B. Ranishenka[3]

[1]Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus, osipov@bsuir.by

[2]Production Unitary Enterprise «FreBor», Borisov, Republic of Belarus

[3]Institute of Physical Organic Chemistry, NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Abstract: this paper addresses the development of a hardware-software platform for diagnostic implantable sensors (DIS). A prototype continuous glucose monitoring (CGM) system based on an optical method is described. A block diagram of the system—comprising an implantable sensor, a transmitter, and a mobile application—is presented. The architecture of the DIS platform, which utilizes RFID/NFC technologies, energy harvesting, and ultra-low-power VLSI circuits, is examined in detail. The sensor's operating principles are outlined, including the charging, measurement, and data transmission cycles, as well as the sensing element based on an indicator gel. The choice of components (STMicroelectronics) is justified, and the advantages of the developed platform are highlighted: compact dimensions, battery-free operation, support for the ISO/IEC 15693 protocol, and self-diagnostic modes. These features enable the platform to be used in the creation of a wide range of intelligent implantable medical devices.

Keywords: implantable electronic devices, diagnostic implantable sensors, continuous glucose monitoring, biomedical measurements.

УДК 621.382

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МАРШРУТА ФОРМИРОВАНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ПРИБОРНЫХ СТРУКТУР С ПРОЕКТНЫМИ НОРМАМИ 90 НМ

Новиков Ф.П., Пашкевич В.Э., Ветошкин В.В., Якуш В.С., Волчёк В.С., Ловшенко И.Ю.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Минск, Республика Беларусь, lovshenko@bsuir.by

Аннотация: в работе представлены результаты компьютерного моделирования полного технологического маршрута формирования n-канального МОП-транзистора с проектными нормами 90 нм, охватывающего более 20 основных и 50 вспомогательных операций. Рассмотрены этапы формирования изоляции типа «мелкая канавка» глубиной 310 нм с углом наклона стенок 85°, выращивания подзатворного диэлектрика толщиной 7 нм, формирования поликремниевого затвора длиной 140 нм и боковых диэлектрических спейсеров шириной 50 нм.

Ключевые слова: САПР, моделирование, 90 нм, метод Монте-Карло, ионная имплантация.

I. ВВЕДЕНИЕ

Для полупроводниковых структур, сформированных по проектным нормам 90 нм нереализуемо масштабирование по Деннарду [1] вследствие экспоненциального роста токов утечки через подзатворный диэлектрик. Для снижения этого эффекта применён нитридированный оксид кремния (SiON) с эквивалентной оксидной толщиной от 1,6 до 2,0 нм. Применение технологии напряжённого кремния (эпитаксиальный SiGe) в сток-истоковых областях МОП-транзисторов позволяет создать сжимающее и растягивающее напряжения в области канала для p- и n-канальных транзисторов соответственно. Литография реализована на ArF-эксимерных лазерах (λ = 193 нм) с числовой апертурой до 0,93. Технологический маршрут включает плазменное травление канавок для формирования межэлементной изоляции, имплантацию B/P/As с энергиями от 1 до 200 кэВ, быстрый термический отжиг при пиковых температурах до 1100 °C и формирование силицида никеля для контактных областей.

Моделирование процессов требует учёта нестационарной ускоренной диффузии, кластеризации примесей, квантово-механических поправок для инверсионного слоя и короткоканальных эффектов с решением 2D/3D уравнений Пуассона и непрерывности.

II. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Выполнена настройка параметров физико-математических моделей технологических операций в пакетах Athena и Victory Process, обеспечивающих моделирование технологического маршрута формирования приборных структур с проектными нормами 90 нм. Калибровка проведена сопоставлением расчётных профилей легирования, глубин переходов и толщин диэлектриков с эталонными SIMS-данными. Для имплантации – ключевой операции формирования карманов, HALO, LDD и сток-истоковых областей используется оператор IMPLANT с обязательными параметрами DOPANT, ENERGY, DOSE; параметр SUB.ROT задаёт ориентацию подложки (<100> при 0°, <110> при 45°) и критичен для моделирования каналирования при малых углах. В Athena реализован аналитический метод на основе таблиц моментов – быстрый, но ограниченный углами наклона >10°, не учитывающий затенение, обратное рассеяние и накопление дефектов. Victory Process поддерживает метод Монте-Карло (BCA) с числом траекторий N.ION, который учитывает кристаллическую структуру, ядерное и электронное торможение, каскады столкновений; установлено, что для бора с энергией больше 10 кэВ необходимо использовать количество ионов не меньше 500 000, для мышьяка – от 100 000 до 300 000, а оптимальное значение подобрано посредством 1D-моделирования. Victory Process автоматически накапливает повреждения (аморфизация, избыточные межузельные атомы) при последовательных имплантациях без отжига, что влияет на деканализацию последующих ионов, в то время как в Athena этот эффект отсутствует. Температура пластины учитывается только при применении метода Монте-Карло. Также в Victory Process диффузия описывается парными моделями с параметром DAM.FAC, масштабирующим начальную концентрацию межузельных атомов (калибруется по глубине p-n-перехода).

Показано, что Victory Process обеспечивает более качественное автоматическое построение сетки и лучшую сходимость по сравнению с Athena, а большинство вычислительно трудоёмких численных алгоритмов в Victory Process эффективно распараллелены. Результирующая полная структура n-канального МОП-транзистора представлена на рисунке 1.

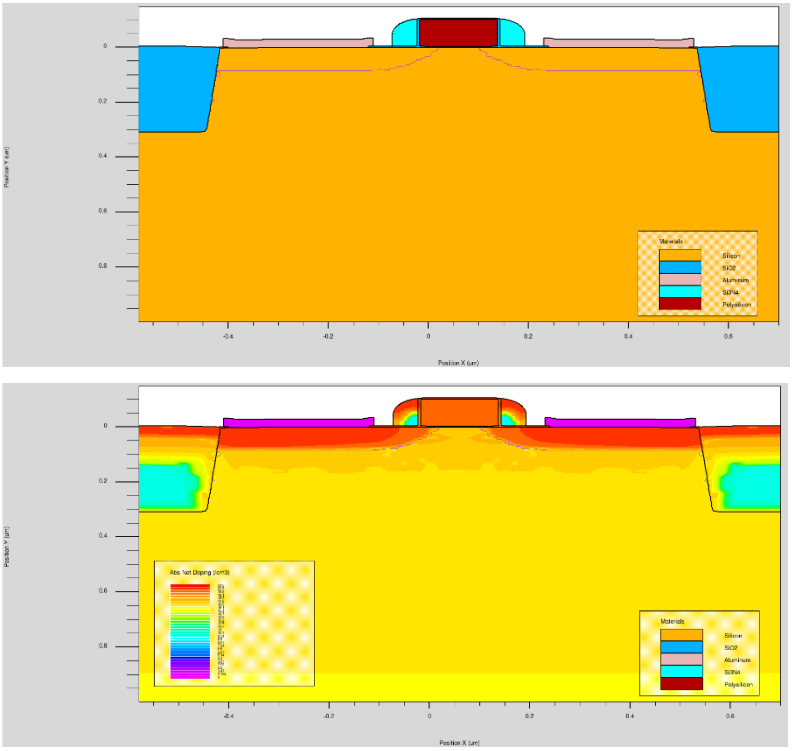


Рисунок 1. Итоговая структура МОП-транзистора с отображением границ p-n-переходов (а) и распределения примеси (б)

В ходе моделирования подтверждено, что при использовании метода Монте-Карло линейное распараллеливание расчетов приводит к существенному увеличению производительности. Так, использование механизмов распараллеливания вычислений до 12 потоков обеспечило десятикратное ускорение наиболее ресурсоёмких этапов моделирования без потери точности по сравнению со стандартным подходом, реализованным в Athena. Установлена эффективность применения физической модели термического окисления с решением уравнений вязкого течения для непланарных структур, что исключило появление ошибок, связанных с расчетной сеткой на наклонных поверхностях, и повысило скорость сходимости расчёта до 30 % по сравнению со стандартными подходами.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что для имплантации при формировании областей карманов, пороговых и исток-стоковых областей обязательно применение статистического метода Монте-Карло с набором от 300 000 до 2 000 000 траекторий ионов. Применение метода Монте-Карло при моделировании технологического маршрута формирования кремниевых приборных структур с проектными нормами 90 нм позволяет корректно учесть эффекты каналирования и накопления кристаллических повреждений, а использование Victory Process обеспечивает повышенную точность и производительность расчётов.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Design of ion-implanted MOSFET's with very small physical dimensions / R. H. Dennard [et al.] // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 1974. – Vol. SC-9, № 5. – P. 256–268.

MONTE CARLO SIMULATION OF PROCESS FLOW FOR SILICON DEVICE STRUCTURES

F.P. Novikau, V.E. Pashkevich, V.V. Vetoshkin, V.S. Yakush, V.S. Volcheck, I.Yu. Lovshenko

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus, lovshenko@bsuir.by

Abstract: this paper presents the results of computer simulation of the complete process flow for forming an n-channel MOSFET with 90 nm node, covering more than 20 main and 50 auxiliary operations. The stages of forming shallow trench isolation with a depth of 310 nm and an 85° sidewall slope angle, a gate dielectric with a thickness of 7 nm, a polysilicon gate with a length of 140 nm and sidewall spacers with a width of 50 nm are considered.

Keywords: CAD, simulation, 90 nm, Monte Carlo method, ion implantation.

УДК 681.586.2

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИИ УПРУГОГО ПОДВЕСА ДАТЧИКА УГЛА НАКЛОНА С ЭЛЛИПТИЧЕСКИМ ПОПЕРЕЧНЫМ СЕЧЕНИЕМ

Корсак К.В., Новиков П.Э., Шляев В.А., Баранова М.С.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, k.korsak@bsuir.by

Аннотация: выполнен конечно-элементный анализ деформации упругого подвеса датчика угла наклона в среде ANSYS. Построена геометрическая модель «опора – балка» из монокристаллического кремния. Проведено сравнение максимальной деформации подвеса квадратного сечения 20 × 20 мкм и эллиптического сечения площадью 100 мкм^2 при воздействии распределенной нагрузки, эквивалентной проекции ускорения свободного падения. Показано, что эллиптическое сечение обеспечивает увеличение деформации в 3,2 раза (с 31,4 до 101,8 мкм) без изменения длины подвеса.

Ключевые слова: МЭМС, подвес, деформация, эллиптическое сечение, метод конечных элементов, кремний, датчик угла наклона.

I. ВВЕДЕНИЕ

Упругий подвес является ключевым элементом конструкции МЭМС-датчиков угла наклона [1, 2], поскольку его изгибная жесткость определяет перемещение инерционной массы при наклоне и, как следствие, чувствительность емкостного датчика. Геометрия поперечного сечения подвеса непосредственно влияет на его жесткость на изгиб. Цель работы – конечно-элементный анализ деформации подвеса МЭМС-датчика угла наклона и оценка влияния формы поперечного сечения на величину максимального перемещения свободного конца.

II. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИИ

Создана упрощенная модель «опора – балка» для верификации геометрии и предварительной оценки жесткости подвеса. Опора выполнена в виде прямоугольной призмы, балка примыкает к ней без зазора. Тела объединены операцией логического сложения, что соответствует формированию структуры из единого слоя кремния. Материал – монокристаллический кремний (ρ = 2320 кг/м^3, E = 130 ГПа, ν = 0,28) [3]. Конечно-элементная сетка уточнялась в зоне закрепления балки. Геометрическая модель подвеса квадратного сечения приведена на рис. 1.

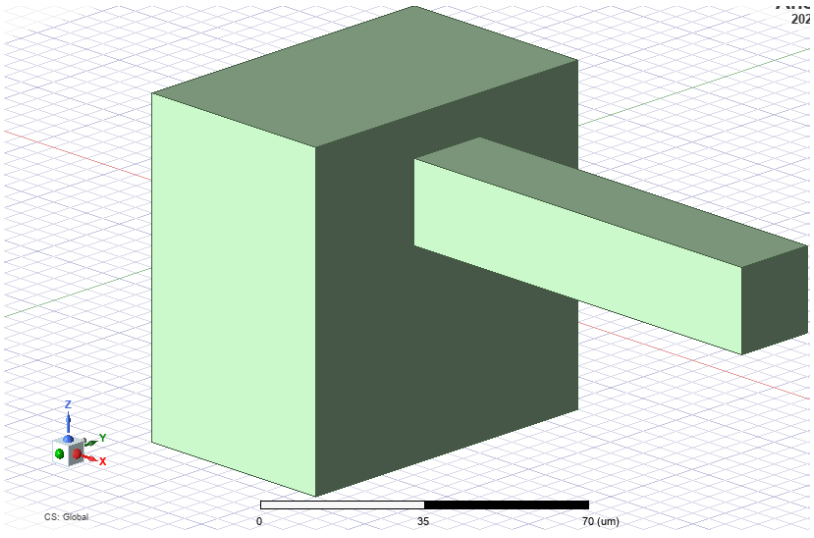


Рисунок 1. Геометрическая модель подвеса с квадратным поперечным сечением 20 × 20 мкм и опорой

В модуле статического структурного анализа на опору наложено условие жесткого закрепления, на свободный конец балки приложена распределенная нагрузка, эквивалентная воздействию инерционной массы при проекции ускорения свободного падения (1 g) на чувствительную ось, направленная перпендикулярно оси подвеса. Распределение деформации в подвесе квадратного сечения показано на рис. 2. Максимальная деформация составила 31,4 мкм.

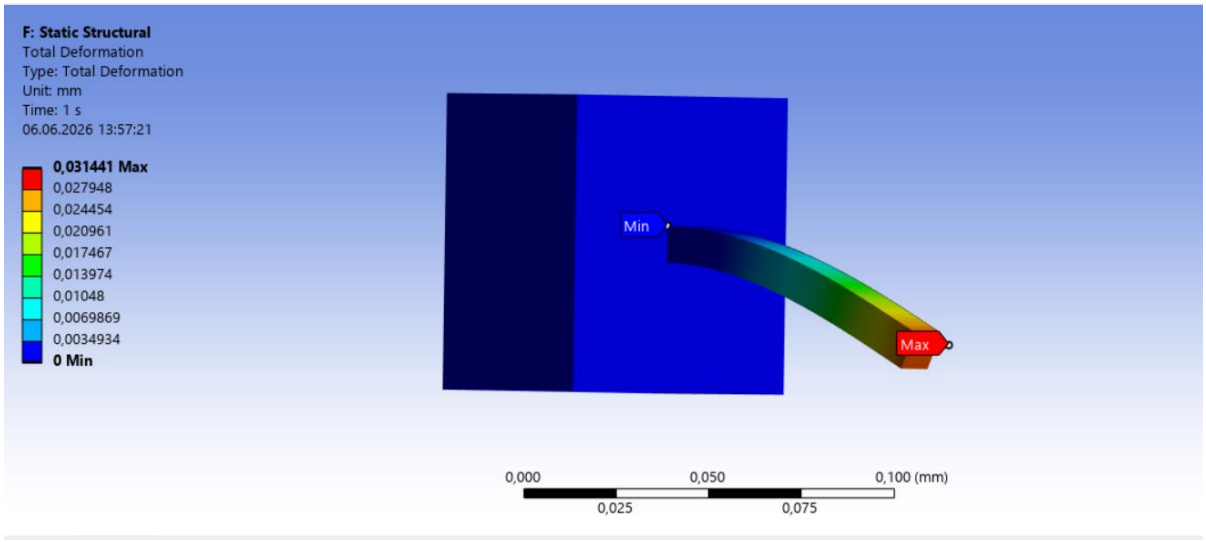


Рисунок 2. Распределение деформации в подвесе квадратного сечения при нагрузке, эквивалентной 1 g

Для увеличения деформации без изменения длины подвеса рассмотрено эллиптическое поперечное сечение площадью 100 мкм^2 (большая ось 20 мкм, малая ось 6,4 мкм), ориентированное малой осью в направлении измерительной деформации. Уменьшение момента инерции сечения относительно оси изгиба снижает изгибную жесткость. Максимальная деформация составила 101,8 мкм, что в 3,2 раза превышает значение для квадратного сечения при идентичных граничных условиях.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен конечно-элементный анализ деформации упругого подвеса МЭМС-датчика угла наклона. Показано, что замена квадратного поперечного сечения 20 × 20 мкм на эллиптическое сечение площадью 100 мкм^2 обеспечивает увеличение максимальной деформации свободного конца с 31,4 до 101,8 мкм (в 3,2 раза) при сохранении длины подвеса. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения эллиптического сечения для повышения чувствительности МЭМС-датчиков угла наклона.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Wang, S. A Novel Single-Axis MEMS Tilt Sensor with a High Sensitivity in the Measurement Range from 0° to 360° / S. Wang, X. Wei, Y. Weng [et al.] // Sensors. 2018. Vol. 18, No. 2. Art. 346. DOI: 10.3390/s18020346.

[2] Zou, X. A high-resolution micro-electro-mechanical resonant tilt sensor / X. Zou, P. Thiruvenkatanathan, A. A. Seshia // Sensors and Actuators A: Physical. 2014. Vol. 220. P. 168–177. DOI: 10.1016/j.sna.2014.10.004.

[3] Пайн Со Хту. Моделирование и оптимизация емкостного МЭМС-датчика ускорения гребенчатого типа / Пайн Со Хту, В. В. Калугин, Е. С. Кочурина // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28, № 4. С. 452–460. DOI: 10.24151/1561-5405-2023-28-4-452-460.

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF THE DEFLECTION OF A MEMS TILT SENSOR ELASTIC SUSPENSION WITH AN ELLIPTICAL CROSS-SECTION

K. Korsak, P. Novikov, V. Shlyaev, M. Baranava

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
k.korsak@bsuir.by

Abstract: a finite element analysis of the deflection of a MEMS tilt sensor elastic suspension was performed in ANSYS. A geometric model "support – beam" made of single-crystal silicon was constructed. Comparison of the maximum deflection of a suspension with a 20 × 20 μm square cross-section and an elliptical cross-section of 100 μm² area under a distributed load equivalent to the gravitational acceleration projection showed a 3.2-fold increase in deflection (from 31.4 to 101.8 μm) without changing the suspension length.

Keywords: MEMS, suspension, deflection, elliptical cross-section, finite element method, silicon, tilt sensor.

УДК 621.382

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИДЕНТИФИЦИРУЕМОСТИ ПАРАМЕТРОВ КОМПАКТНЫХ МОДЕЛЕЙ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ГАФНИЯ

Новиков П.Э., Стемпицкий В.Р.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, p.novikov@bsuir.by

Аннотация: в работе представлен статистический анализ процедуры экстракции параметров компактных моделей сегнетоэлектрических конденсаторов на основе оксида гафния. С использованием метода Монте-Карло и аддитивного гауссовского шума с относительным стандартным отклонением 2 % показано, что параметры, описывающие переключение поляризации и токи утечки, извлекаются со средней абсолютной процентной ошибкой не более 2,1 %. Для емкостных параметров, включая диэлектрическую проницаемость интерфейсного слоя и концентрацию носителей заряда в обедненных областях, характерна ошибка от 15 до 86 %. Выявлены причины слабой идентифицируемости: неустойчивость экстраполяции линейной регрессии обратной емкости при малой толщине интерфейсного слоя и эффект экранирования пика нелинейной емкости обедненной области линейными емкостями структуры. Предложены рекомендации по фиксации слабо идентифицируемых параметров.

Ключевые слова: сегнетоэлектрическая память, оксид гафния, компактная модель, экстракция параметров, метод Монте-Карло, Verilog-A, FeRAM.

I. ВВЕДЕНИЕ

Сегнетоэлектрические конденсаторы на основе оксида гафния (HfO_2) рассматриваются как элементная база энергонезависимой памяти и нейроморфных схем [1]. Интеграция данных устройств в схемотехнические САПР требует использования компактных моделей на языках описания аппаратуры (например, Verilog-A) [2], для которых, в отличие от моделей МОП-транзисторов, систематизированные методики идентификации параметров отсутствуют, а их уточнение проводится путем ручной подгонки [3]. Цель работы – оценка границ идентифицируемости параметров компактных моделей сегнетоэлектрических конденсаторов из стандартного набора экспериментальных характеристик для соответствующего типа устройств.

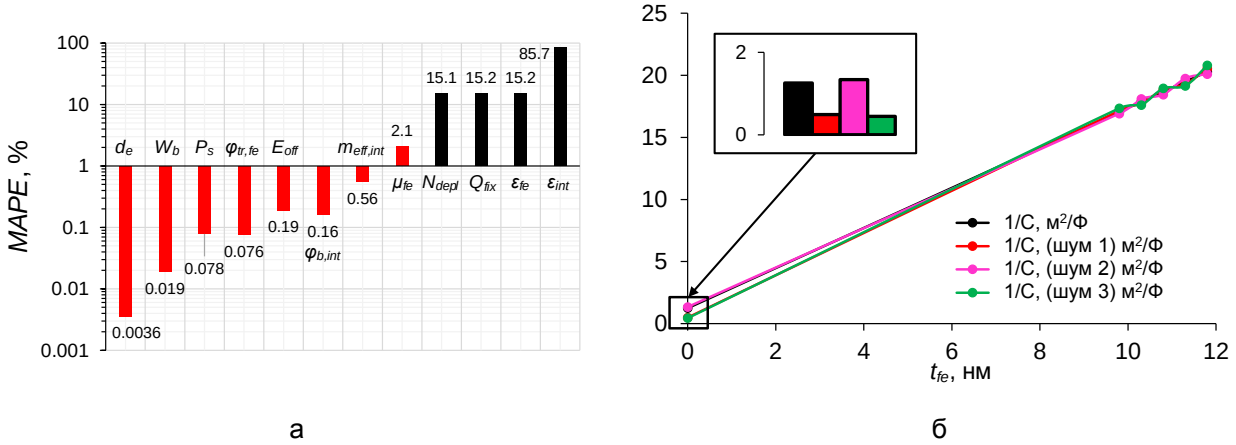
II. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Исследована компактная модель *Heracles*, в соответствии с которой конденсатор разделяется на сегнетоэлектрический слой (*fe*), интерфейсный слой (*int*) и обедненные слои электродов (*depl*); полная таблица параметров модели приведена в [2]. Проведена генерация стандартных эксплуатационных характеристик конденсатора, имитирующих экспериментальные данные и включающих вольт-фарадные характеристики при частоте 10 Гц, вольт-амперные характеристики при температурах 21 и 85 °C (от 0 до 3 В в обоих случаях), зависимость емкости от толщины сегнетоэлектрика (в диапазоне от 9,8 до 11,8 нм) и переходные характеристики при воздействии ступенчатых импульсов напряжения амплитудой 0,8; 0,9 и 1,0 В. На все массивы данных наложен гауссовский шум с относительным стандартным отклонением 2 %. Оценка идентифицируемости выполнена методом Монте-Карло за 100 итераций, для каждой из которых параметры модели варьировались в физически корректных пределах, после чего выполнены их последовательная экстракция (идентификация) и сравнение с истинными (исходными) значениями.

Параметры переключения поляризации (спонтанная поляризация P_s, внутреннее поле E_{off}, расстояние действия поля d_e, энергетический барьер W_b) и токов утечки (высота барьера $\varphi_{b,int}$, эффективная масса m_{eff}, уровень ловушки $\varphi_{tr,fe}$, подвижность μ_{fe}) извлекаются со средней относительной ошибкой (англ. Mean Absolute Percentage Error, MAPE) не более 2,1 %, что соответствует однозначной идентификации вольт-амперных и переходных характеристик, полученных с использованием моделей Фаулера-Нордгейма и Пула-Френкеля.

Емкостные параметры (диэлектрическую проницаемость сегнетоэлектрического слоя ε_{fe}, диэлектрическая проницаемость интерфейсного слоя ε_{int}, концентрация носителей заряда в обедненных областях электродов N_{depl}, плотность заряда на границе раздела сегнетоэлектрического и интерфейсного слоев Q_{fix}) имеют *MAPE* от 15 до 86 % (рисунок 1, а). Основная причина высокой ошибки для ε_{int} связана с тем, что при расчете общей емкости структуры как последовательного соединения емкостей слоев, описываемого уравнением модели [2] $1/C = t_{fe} / (\varepsilon_0\varepsilon_{fe}) + t_{int} / (\varepsilon_0\varepsilon_{int})$, толщина

интерфейсного слоя ($t_{int} \approx 1$ нм) на порядок меньше толщины сегнетоэлектрика ($t_{fe} \approx 10$ нм), и свободный член регрессии, определяющий ε_{int}, оказывается крайне чувствительным к шуму при экстраполяции к нулевой толщине (рисунок 1, б). Параметры N_{depl} и Q_{fix} слабо идентифицируемы вследствие подавления вклада нелинейной емкости обедненных областей линейными емкостями сегнетоэлектрического и интерфейсного слоев.



а б

Рисунок 1. Результаты статистического анализа: распределение средней относительной ошибки извлечения параметров (а); зависимость обратной удельной емкости от толщины сегнетоэлектрического слоя для исходных и зашумленных (3 независимых реализации) данных (б)

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, стандартный набор характеристик обеспечивает возможность однозначного определения параметров переключения поляризации и токов утечки согласно модели *Heracles*. Емкостные параметры интерфейсного и обедненного слоев являются слабо идентифицируемыми и рекомендуются к фиксации на основе данных приборного моделирования.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках гранта БРФФИ Т25МЭ-042.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Ferroelectricity of hafnium oxide-based materials: Current status and future prospects from physical mechanisms to device applications / W. Yang, C. Yu, H. Li [et al.] // Journal of Semiconductors. – 2023. – Vol. 44, № 5. – P. 053101.

[2] Heracles: A HfO_2 Ferroelectric Capacitor Compact Model for Efficient Circuit Simulations / L. Fehlings, M.H. Ali, P. Gibertini [et al.] // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2025.

[3] Compact model parameter extraction via derivative-free optimization / R.P. Martinez, M. Iwamoto, K. Woo [et al.] // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 123224-123235.

STATISTICAL ANALYSIS OF PARAMETER IDENTIFIABILITY FOR COMPACT MODELS OF HAFNIUM OXIDE-BASED FERROELECTRIC CAPACITORS

P.E. Novikov, V.R. Stempitsky

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
p.novikov@bsuir.by

Abstract: a statistical analysis of the parameter extraction procedure for physics-based compact models of hafnium oxide ferroelectric capacitors is presented. Using the Monte Carlo method and 2 % Gaussian noise, it is shown that polarization switching and leakage current parameters are extracted with a mean absolute percentage error below 2.1%. Capacitive parameters, including interface permittivity and depletion carrier density, exhibit errors from 15% to 86%. Fundamental causes of weak identifiability are identified: instability of inverse capacitance linear regression extrapolation at small interface thicknesses, and the masking effect of linear capacitances on the nonlinear depletion capacitance peak. Recommendations for fixing weakly identifiable parameters are proposed.

Keywords: ferroelectric memory, hafnium oxide, compact model, parameter extraction, Monte Carlo method, Verilog-A, FeRAM.

УДК 621.382.322

ПОДХОДЫ К МНОГОУРОВНЕВОМУ КОМПЬЮТЕРНОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ ТРАНЗИСТОРОВ С КРУГОВЫМ ЗАТВОРОМ С HIGH-K ДИЭЛЕКТРИКАМИ

Корсак К.В., Новиков Ф.П.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, k.korsak@bsuir.by

Аннотация: рассмотрены подходы к многоуровневому компьютерному проектированию транзисторов с круговым затвором, содержащих подзатворный диэлектрик с высокой относительной диэлектрической проницаемостью (high-k). Описаны задачи технологического, приборного и схемотехнического уровней моделирования. Определены особенности, обусловленные геометрией канала, свойствами high-k и паразитными параметрами структуры.

Ключевые слова: транзистор с круговым затвором, high-k диэлектрик, компьютерное проектирование, приборное моделирование, технологическое моделирование, схемотехническое проектирование.

I. ВВЕДЕНИЕ

Транзисторы с круговым затвором (архитектура Gate-All-Around, GAA) рассматриваются как базовая структура транзисторного элемента в кремниевой КМОП-технологии ближайших поколений [1]. Канал в таких приборах формируется в виде одного или нескольких горизонтальных кремниевых слоев, полностью окруженных затворным электродом, что обеспечивает электростатический контроль канала по всей его поверхности. Подзатворный диэлектрик выполняется из материалов с высокой относительной диэлектрической проницаемостью (high-k): оксидов гафния, циркония, их твердых растворов и силицидов, что позволяет снизить ток утечки через затвор при сохранении управляющей емкости [2].

Проектирование указанных приборов требует последовательного компьютерного моделирования на нескольких уровнях: от воспроизведения технологического процесса формирования структуры до расчета электрических характеристик транзистора и проектирования схем на его основе. Блок-схема многоуровневого компьютерного проектирования приведена на рис. 1. Каждый уровень предъявляет собственные требования к физическим моделям, граничным условиям и вычислительным ресурсам.

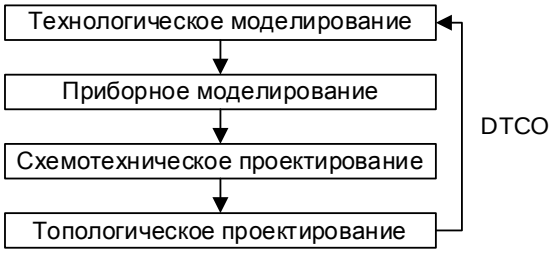


Рисунок 1. Блок-схема многоуровневого компьютерного проектирования

Цель настоящей работы – систематизация подходов к многоуровневому компьютерному проектированию транзисторов с круговым затвором с high-k диэлектриками и определение особенностей, учитываемых на каждом уровне моделирования, при совместной оптимизации проектирования и технологии производства (англ. Design-Technology Co-Optimization, DTCO).

II. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На технологическом уровне воспроизводится последовательность операций формирования транзисторной структуры: эпитаксиальное выращивание чередующихся слоев кремния и кремний-германиевых соединений, селективное удаление последних для образования каналов, формирование изолирующих областей, осаждение диэлектрической структуры и затворного электрода [3].

Специфика моделирования для GAA-структур состоит в необходимости корректного описания процессов осаждения на трехмерные поверхности с высоким соотношением сторон. При формировании high-k диэлектрика методом атомно-слоевого осаждения критичным является учет конформности покрытия на боковых гранях канала: толщина пленки на вертикальных поверхностях может отличаться от толщины на горизонтальных на 10–20 %, что приводит к неоднородности электрических параметров [2]. Моделирование данного процесса требует задания зависимостей

скорости роста от локальной геометрии, температуры и давления прекурсоров. Указанные задачи решаются средствами технологического моделирования, позволяющими оперировать последовательностями операций и отслеживать эволюцию профиля структуры (табл. 1).

Таблица 1. Задачи, решаемые задачи и инструментальные средства по уровням проектирования

Уровень моделирования	Решаемые задачи	Инструменты
Технологический	Профиль структуры, легирование, конформность	Silvaco Athena, Victory Process; Synopsys Centaurus
Приборный	ВАХ, пороговое напряжение, подпороговый наклон, емкости, токи утечки	Silvaco Atlas, Victory Device; Synopsys Centaurus Device; Ansys
Схемотехнический	Компактные модели, параметры ячеек, задержки, энергопотребление	Cadence Virtuoso
Топологический	Размещение, трассировка, верификация, RC-экстракция	Cadence Genus, Cadence Innovus

III. ПРИБОРНЫЙ УРОВЕНЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Приборное моделирование направлено на расчет вольт-амперных характеристик, порогового напряжения, подпорогового наклона и емкостных параметров. Для GAA-транзисторов при толщинах канала менее 10 нм необходимо учитывать квантовое ограничение носителей заряда в поперечном сечении, что требует совместного решения уравнений Шредингера и Пуассона [1]. Существенное влияние оказывает поверхностное рассеяние носителей на границе кремний–диэлектрик, а также наличие фиксированного заряда и интерфейсных состояний в high-k структуре.

При задании затворной диэлектрической структуры эквивалентная оксидная толщина вычисляется по соотношению

$$EOT = t_{IL} + (\varepsilon_{SiO_2} / \varepsilon_k) t_k, \quad (1)$$

где t_{IL} – толщина межфазного слоя SiO_2; ε_k, t_k – диэлектрическая проницаемость и физическая толщина high-k слоя. Поправка к ширине запрещенной зоны, обусловленная квантовым ограничением, оценивается как

$$\Delta E_g \approx (h^2/(8 \cdot t_{si}^2)) \cdot (1/m_e^* + 1/m_h^*), \quad (2)$$

где h – постоянная Планка; m_e^*, m_h^* – эффективные массы электронов и дырок; t_{si} – толщина канала. При t_{si} = 4–7 нм поправка достигает 0,1–0,2 эВ и должна учитываться при расчете порогового напряжения и плотности инверсионного заряда [1].

При моделировании high-k диэлектрика необходимо задавать значение относительной проницаемости, параметры зонной диаграммы (ширина запрещенной зоны, сродство к электрону, высоты барьеров для электронов и дырок), а также модели токов утечки через диэлектрик. Указанные параметры принимаются из опубликованных экспериментальных и расчетных данных для конкретных материалов [2]. Решатели, реализующие метод конечных элементов на неструктурированных сетках, позволяют задавать многообластные структуры с различными материалами и извлекать выходные параметры; тепловые и механические аспекты исследуются средствами конечно-элементного анализа (табл. 1).

IV. СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЙ И ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ УРОВНИ

На схемотехническом уровне результаты приборного моделирования используются для формирования компактных моделей транзистора, пригодных для моделирования логических и аналоговых схем. Особенности GAA-структуры (вертикальная структура из нескольких каналов, наличие внутренних изолирующих элементов, увеличенная высота активной области) влияют на паразитные емкости и сопротивления, которые должны быть корректно отражены в компактной модели [3].

Топологическое проектирование включает размещение транзисторов в пределах стандартной ячейки, трассировку межсоединений и верификацию. Корректная экстракция паразитных параметров из

топологии и их обратная связь на уровне компактной модели являются необходимым условием достоверного прогнозирования характеристик схемы и замыкают поток проектирования в контур DTCO (рис. 1). Сводное соответствие задач, физических моделей и инструментальных средств по уровням приведено в табл. 1.

Обязательным элементом методологии является калибровка и верификация моделей на каждом уровне (табл. 2), обеспечивающая предсказательную способность комплекса моделирования при отсутствии собственных экспериментальных образцов.

Таблица 2. Этапы калибровки и верификации комплексов моделирования

Уровень моделирования	Объект калибровки	Критерий верификации
Технологический	Скорости осаждения и травления пленок, форма профиля	Отклонение профиля структуры ≤ 5 %
Приборный	Подвижность, плотность интерфейсных состояний, последовательные сопротивления	Отклонение ВАХ ≤ 10 %
Схемотехнический	Параметры компактной модели	Отклонение от расчета ≤ 5 %
Топологический	Паразитные сопротивления и емкости межсоединений	Согласование с полевым расчетом в пределах ±5 %

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Компьютерное проектирование транзисторов с круговым затвором с high-k диэлектриками представляет собой многоуровневую задачу, охватывающую технологическое, приборное и схемотехническое моделирование, замкнутую обратной связью DTCO. Систематизация подходов на каждом уровне и установление связей между ними являются необходимым условием для разработки сквозной методологии проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Colinge, J.-P. FinFETs and Other Multi-Gate Transistors / J.-P. Colinge. – New York : Springer, 2008. – 380 p.

[2] Robertson, J. High Dielectric Constant Oxides / J. Robertson // The European Physical Journal: Applied Physics. – 2004. – Vol. 28, № 3. – P. 265–291.

[3] Loubet, N. Stacked Nanosheet Gate-All-Around Transistor to Enable Scaling beyond FinFET / N. Loubet [et al.] // IEEE Symp. on VLSI Technology. – 2017. – P. T230–T231.

[4] Silvaco TCAD Software [Electronic resource]. – Mode of access: https://silvaco.com/products/tcad/. – Date of access: 24.09.2026.

APPROACHES TO MULTI-LEVEL COMPUTER-AIDED DESIGN OF GATE-ALL-AROUND TRANSISTORS WITH HIGH-K DIELECTRICS

K. Korsak, F. Novikau

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
k.korsak@bsuir.by

Abstract: approaches to multi-level computer-aided design of gate-all-around transistors with high-permittivity (high-k) gate dielectric are considered. Process-level, device-level, and circuit-level modeling tasks are described. Features related to channel geometry, high-k stack properties, and parasitic parameters are identified. The design flow is closed by a DTCO feedback loop.

Keywords: gate-all-around transistor, high-k dielectric, computer-aided design, device modeling, process modeling, circuit design.

УДК 538.9:546.681

СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА АЛЛОТРОПНЫХ ФОРМ ОКСИДА ГАЛЛИЯ В РАМКАХ AB INITIO МОДЕЛИРОВАНИЯ

Усенко Е.Е., Булавко К.И., Гвоздовский Д.Ч.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, user5ggg.ru@mail.ru

Аннотация: описаны результаты моделирования структурных свойств аллотропных форм оксида галлия (α, β, γ, δ и ε/κ) с использованием программного комплекса VASP. Моделирование выполнено с применением функционалов PBE (с дисперсионной поправкой) и LDA. Проведен сравнительный анализ расчётных данных с экспериментальными результатами. Установлено, что термодинамическая стабильность полиморфов Ga_2O_3 не имеет прямой корреляции с макроскопической плотностью упаковки.

Ключевые слова: оксид галлия, аллотропные модификации, *ab initio* моделирование, структурные свойства, плотность упаковки, VASP.

I. ВВЕДЕНИЕ

Современная силовая электроника предъявляет всё более жёсткие требования к полупроводниковым материалам: необходимы высокие пробивные напряжения, низкие удельные потери при переключении, термическая стабильность и радиационная стойкость. Традиционные кремниевые приборы приближаются к теоретическому пределу своих характеристик, что стимулирует активный поиск и исследование ультраширокозонных полупроводников.

Одним из наиболее перспективных материалов является оксид галлия (Ga_2O_3). Благодаря ширине запрещенной зоны около 4,8 эВ и рекордному баллиговскому коэффициенту, этот материал на порядок превосходит применяемые сегодня SiC и GaN. Однако Ga_2O_3 обладает богатым полиморфизмом: известны как минимум пять кристаллических модификаций (α, β, γ, δ и ε/κ), существенно различающихся по симметрии, термодинамической стабильности и электрофизическим характеристикам. В настоящее время подавляющее большинство экспериментальных и теоретических исследований сосредоточено на термодинамически наиболее стабильной β-фазе, тогда как структурные и электронные свойства остальных аллотропов изучены фрагментарно и зачастую противоречиво, что ограничивает потенциал применения Ga_2O_3. Проведение систематического сравнительного моделирование основных фаз Ga_2O_3 с использованием единого вычислительного подхода позволит раскрыть потенциал данного материала для силовой электроники.

Настоящая работа посвящена систематическому исследованию структурных свойств пяти полиморфов Ga_2O_3 (α-, β-, γ-, δ- и ε/κ-фазы) методами ab initio. В современной кристаллографии ε- и κ-фазы часто рассматривают как один и тот же политип Ga_2O_3 (или κ как низкотемпературную модификацию ε), поэтому ε/κ-фазу далее по тексту именуем κ-фазой.

II. ДЕТАЛИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Расчёты полной энергии и структурных характеристик исследуемых материалов выполнены с использованием программного пакета VASP [1]. Моделирование проводилось с использованием двух вариантов обменно-корреляционного функционала: LDA и PBE с дисперсионной поправкой (PBE + IVDW). Для каждого функционала использовался соответствующий файл «POTCAR», в котором содержатся данные о псевдопотенциалах валентных электронов. Расчёт проводился без учёта спиновой поляризации.

Для проведения исследования были подготовлены исходные модели кристаллов пяти фаз оксида галлия: α, β, γ, δ и κ.

Построение α-фазы Ga_2O_3 осуществлялось на основе гексагональной ячейки корунда (прототип α-Al_2O_3) с пространственной группой $R\bar{3}c$ (№ 167) [2]. Значения параметров кристаллической решетки: a = b = 4,9825 Å, c = 13,433 Å (α = β = 90°, γ = 120°). α-Ga_2O_3 включает в себя 6 формульных единиц Ga_2O_3 на элементарную ячейку (30 атомов: 12 Ga + 18 O). В структуре α-Ga_2O_3 атомы кислорода образуют искажённую гексагональную плотноупакованную решётку. Каждый атом галлия находится в октаэдрической координации по отношению к кислороду.

Моделирование кристаллической ячейки β-фазы Ga_2O_3 проводилось на основе теоретических данных, приведенных в работе [3]. β-Ga_2O_3 обладает моноклинной сингонией с пространственной группой

C2/m (№ 12). Значения параметров кристаллической решетки: a = 12,2 Å, b = 3,00 Å, c = 5,8 Å (α = 90°, β = 104°, γ = 90°). β-Ga_2O_3 имеет 4 формульные единицы Ga_2O_3 на элементарную ячейку (20 атомов: 8 Ga + 12 O). β-Ga_2O_3 уникален тем, что содержит два типа координации галлия: Ga(I) находится в тетраэдрическом окружении (4 атома O) – фрагменты [GaO_4] и Ga(II) находится в октаэдрическом окружении (6 атомов O) – фрагменты [GaO_6].

Дефектная структура шпинели [4] использована в качестве основы для создания ячейки γ-фазы Ga_2O_3, которая обладает кубической сингонией, пространственная группа симметрии – $Fd\bar{3}m$ (№ 227). Значения параметров кристаллической решетки: a = b = c = 8,2376 Å (α = β = γ = 90°). Для γ-Ga_2O_3 число формульных единиц – номинально 8 Ga_2O_3 на элементарную ячейку, но из-за дефицита галлия фактическое количество атомов меньше (56 атомов: 24 Ga + 32 O). Структура γ-Ga_2O_3 содержит катионные вакансии. Атомы Ga частично занимают как октаэдрические, так и тетраэдрические позиции, при этом часть позиций остаётся пустой.

Кристаллическая структура δ-фазы Ga_2O_3 проектировалась на основе кубической ячейки биксбиит In_2O_3 с пространственной группой $Ia\bar{3}$ (№ 206). Значения параметров кристаллической решетки: a = b = c = 9,401 Å (α = β = γ = 90°), приняты в соответствие с теоретическими вычислениями [10]. δ-Ga_2O_3 включает в себя 80 атомов (16 формульных единиц Ga_2O_3). Структура биксбиита характеризуется наличием двух типов октаэдрических позиций для Ga^{3+}: тригонально сжатые октаэдрические позиции (1/4 ионов Ga) и искажённые октаэдрические позиции (3/4 ионов Ga). Оба типа окружены четырёхкратно координированным кислородом. Это принципиально отличает δ-фазу от β-Ga_2O_3, где есть как тетраэдрические, так и октаэдрические позиции галлия.

Моделирование ячейки κ-фазы Ga_2O_3 проводилось на основе теоретических данных, приведенных в работе [5]. κ-Ga_2O_3 обладает орторомбической сингонией с пространственной группой $Pna2_1$ (№33). Значения параметров кристаллической решетки: a = 5,0463 Å, b = 8,702 Å, c = 9,2833 Å. κ-Ga_2O_3 обладает слоистой структурой, с упаковкой кислорода ABAC (4H). Галлий занимает октаэдрические и тетраэдрические позиции, образуя зигзагообразные цепочки. κ-Ga_2O_3 имеет 8 формульных единиц Ga_2O_3 на элементарную ячейку (40 атомов).

Перед проведением финального моделирования выполнена оптимизация расчётных параметров. При оптимальной k-сетке (6×6×2 для α-фазы, 2×8×4 для β-фазы и 4×4×4 для γ- и δ-фаз) варьировалась энергия обрезания базиса плоских волн от 200 до 900 эВ. Сходимость полной энергии для всех полиморфов Ga_2O_3 была достигнута при ENCUT = 500 эВ (рис. 1). Структурная релаксация исследуемых структур выполнялась с оптимизированными параметрами: ENCUT = 700 эВ, NSW = 100, IBRION = 2, ISIF = 3.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты расчета структурных характеристик Ga_2O_3 представлены в таблице 1. Сопоставление расчетных параметров с экспериментальными данными подтверждает высокую точность выбранных методов при описании структурно упорядоченных α- и β-фаз: погрешность определения постоянных решетки не превышает 1–2 %. Для κ-Ga_2O_3 также наблюдается хорошее согласие: отклонение параметров решетки от экспериментальных значений составляет менее 1 %.

Таблица 1. Структурные характеристики фаз Ga_2O_3

Фаза	Параметр	Обменно-корреляционный функционал		Эксп. данные [6-9]
		PBE + IVDW	LDA	
α-Ga_2O_3	Постоянная решётки a, b, Å	5,052	4,966	4,98
	Постоянная решётки c, Å	13,57	13,31	13,43
	Удельный объем, $Å^3$/ф.ед	49,99	47,38	–
	Полная энергия, эВ/ф.ед.	-31,12	-31,13	–
β-Ga_2O_3	Постоянная решётки a, Å	12,395	12,117	12,2
	Постоянная решётки b, Å	3,085	3,03	3,0
	Постоянная решётки c, Å	5,891	5,79	5,8
	Угол β, °	103,75	103,86	104
	Удельный объем, $Å^3$/ф.ед	54,70	51,67	–

	Полная энергия, эВ/ф.ед.	-31,00	-34,87	–
γ-Ga_2O_3*	Постоянная решётки a, Å	8,57	8,41	8,325
	Удельный объем, Å^3/ф.ед	52,51	49,68	–
	Полная энергия, эВ/ф.ед.	-27,72	-31,2	–
δ-Ga_2O_3	Постоянная решётки a, b, c, Å	9,373	9,349	9,83-10,03
	Длины межатомных связей Ga-O, Å	1,96-2,186	1,96-2,186	1,99-2,04
	Удельный объем, Å^3/ф.ед	51,47	51,08	–
	Полная энергия, эВ/ф.ед.	-31,1	-31,2	–
κ-Ga_2O_3	Постоянная решётки a, Å	5,127	5,021	5,046
	Постоянная решётки b, Å	8,779	8,659	8,702
	Постоянная решётки c, Å	9,385	9,237	9,283
	Удельный объем, Å^3/ф.ед	52,84	52,84	–
	Полная энергия, эВ/ф.ед.	-30,95	-30,95	–

*под «ф.ед.» для γ-фазы понимается приведенная формульная единица, пересчитанная с учетом вакансий

Расхождение параметров для γ-фазы (расчетное значение *a* = 8,57 Å против экспериментального 8,325 Å) объясняется жесткой локализацией вакансий в моделируемой суперячейке. В реальных кристаллах вакансии распределены статистически хаотично, что при экспериментальных измерениях приводит к макроскопическому усреднению параметров решетки и их эффективному уменьшению.

Оценка термодинамической стабильности полиморфных модификаций Ga_2O_3 демонстрирует существенную чувствительность к выбору обменно-корреляционного функционала. Приближение локальной плотности (LDA) корректно воспроизводит физическую картину, устанавливая глубокий глобальный минимум полной энергии для моноклинной β-фазы (*E* = -34,87 эВ/ф.ед.). Напротив, применение градиентного приближения с дисперсионной поправкой (PBE+IVDW) приводит к нефизичному энергетическому вырождению α-, β- и δ-модификаций, сжимая их энергии в узкий интервал от -31,00 до -31,12 эВ/ф.ед. Тем не менее, данный подход достоверно фиксирует крайнюю термодинамическую неустойчивость разупорядоченной γ-фазы (*E* = -27,72 эВ/ф.ед.), которая оказывается значительно выше по энергии относительно других полиморфов. Энергия κ-фазы в обоих функционалах занимает промежуточное положение (около -30,95 эВ/ф.ед.), подтверждая её метастабильный характер.

Анализ удельных объемов фаз свидетельствует об отсутствии прямой корреляции между термодинамической стабильностью материала и плотностью упаковки атомов. Основное энергетическое состояние (β-фаза) реализуется в кристаллической решетке с наименьшей плотностью упаковки и максимальным удельным объемом (*V* = 54,70 Å^3/ф.ед. по PBE). В то же время α-фаза, характеризующаяся наиболее плотной упаковкой (49,99 Å^3/ф.ед. по PBE), является метастабильной. κ-Фаза демонстрирует удельный объем (~52,84 Å^3/ф.ед.), промежуточный между плотноупакованной α-фазой и рыхлой β-фазой, что согласуется с её слоистой структурой и смешанной координацией катионов.

Оценка перспективности полиморфных модификаций оксида галлия для высоковольтных силовых приборов требует комплексного анализа, связывающего фундаментальные параметры зонной структуры с фазовой стабильностью и локальной атомной координацией. Ключевую роль играют ширина запрещенной зоны *Eg*, определяющая критическое поле пробоя, и эффективная масса носителей заряда, зависящая от кривизны зон. Расчет этих электронных свойств с использованием гибридных функционалов планируется в рамках следующего этапа исследования.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнено систематическое *ab initio* моделирование структурных свойств пяти полиморфных модификаций оксида галлия (α, β, γ, δ и κ) с использованием программного комплекса VASP. Верификация методов показала высокую точность описания упорядоченных фаз (α, β, κ) с погрешностью параметров решетки в пределах 1–2 %.

Установлено, что выбор функционала критически влияет на оценку относительной стабильности фаз. LDA правильно предсказывает β-Ga_2O_3 как термодинамически наиболее стабильную фазу. PBE+IVDW, несмотря на значительное вырождение энергий стабильных фаз (α, β, δ), корректно идентифицирует γ-Ga_2O_3 как крайне нестабильную модификацию.

Выявлено, что термодинамическая стабильность не коррелирует с плотностью упаковки: самая стабильная β-фаза имеет наибольший удельный объем, а плотноупакованная α-фаза метастабильна. к-фаза подтверждена как метастабильная структура с промежуточными структурными характеристиками.

Практический вывод заключается в том, что использование полиморфов Ga_2O_3 в электронике требует компромисса: β-фаза остается стандартом для силовой электроники благодаря стабильности, тогда как метастабильные α- и δ-фазы перспективны для специализированных оптоэлектронных и высокочастотных применений, где важны прямозонность и свойства гетероструктур. Дальнейшие исследования будут направлены на расчет электронной структуры (ширины запрещенной зоны и эффективных масс) для количественной оценки транспортных свойств всех рассмотренных полиморфов.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Kresse, G. Efficient iterative schemes for ab initio total-energy calculations using a plane-wave basis set / G. Kresse, J. Furthmüller // Phys. Rev. B. – 1996. – Vol. 54. – P. 11169.

[2] X. Han, Y. Liu, Y. Li, M. L. Crespillo, E. Zarkadoula, W. Mu, P. Liu, Unraveling the Atomic Mechanism of the Crystalline Phase-Dependent Structural Features and Special Spectral Design of α-, β-, and ε-Ga_2O_3. – Adv. Sci. 2025, 12.

[3] Gallium Oxide: Materials Properties, Crystal Growth, and Devices / ed. by M. Higashiwaki, S. Fujita. – Cham: Springer International Publishing, 2020. – 764 p. – (Springer Series in Materials Science; vol. 293).

[4] Ratcliff, L.E., Oshima, T., Nippert F., et al. Tackling Disorder in γ-Ga_2O_3. – Adv. Mater. – 2022. – 34. – P. 2204217.

[5] Cora, I., Mezzadri, F., Boschi, F. et al. The real structure of ε-Ga_2O_3 and its relation to κ-phase. – CrystEngComm, – 2017. – 19(11). – P.1509–1516.

[6] Marezio, M., Remeika, J. P. Bond Lengths in the *α*-Ga_2O_3 Structure and the High-Pressure Phase of $Ga_{2-x}Fe_xO_3$. – J. Chem. Phys. – 1967. – 46. – P. 1862–1865.

[7] Higashiwaki, M. *β*-Ga_2O_3 material properties, growth technologies, and devices: a review. – AAPPS Bull. – 2022. – 32. – P. 3.

[8] Playford, H.Y., Hannon, A.C., Tucker, M.G., et al. Characterization of Structural Disorder in *γ*-Ga_2O_3. – J. Phys. Chem. C – 2014. – 118. – P. 16188–16198.

[9] Zhang, J., et al. Nano-structured phases of gallium oxide (GaOOH, α-Ga_2O_3, β-Ga_2O_3, γ- Ga_2O_3, δ- Ga_2O_3 and ε- Ga_2O_3): Fabrication, structural, and electronic structure investigations // Nanoscale. – 2020. – Vol. 12. – P. 13718–13738.

[10] Yoshioka, S. Structures and energetics of Ga_2O_3 polymorphs / S. Yoshioka, H. Hayashi, A. Kuwabara, F. Oba, K. Matsunaga, I. Tanaka // J. Phys.: Condens. Matter. – 2007. – Vol. 19. – P. 346211.

STRUCTURAL PROPERTIES OF GALLIUM OXIDE ALLOTROPIC FORMS VIA AB INITIO SIMULATION

E. Usenko, K. Bulavko, D. Hvazdouski

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
user5ggg.ru@mail.ru

Abstract: the paper describes the results of modeling the structural properties of gallium oxide allotropic forms (α, β, γ, δ, ε/κ) using the VASP software package. The simulations were performed applying PBE (with dispersion correction) and LDA functionals. A comparative analysis of the calculated data with experimental results was conducted. It has been established that the thermodynamic stability of Ga_2O_3 polymorphs has no direct correlation with the macroscopic packing density.

Keywords: gallium oxide, allotropic modifications, ab initio modeling, structural properties, thermodynamic stability, packing density, VASP.

УДК 621.382

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ ОБРАЗОВАНИЯ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ ТИПА «ВАКАНСИЯ» КОНСТРУКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИБОРНЫХ СТРУКТУРАХ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ, СФОРМИРОВАННЫХ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ

Булавко К.И., Усенко Е.Е., Пашкевич В.Э., Гвоздовский Д.Ч.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, gvozdovsky@bsuir.by

Аннотация: в работе представлены результаты квантово-механического моделирования точечных дефектов типа «вакансия» в кристаллическом кремнии и α-кварце (SiO_2), выступающих в качестве конструктивных материалов приборных структур микроэлектроники. Расчеты выполнены в программном пакете VASP с использованием PAW-псевдопотенциалов и функционала PBE-D3(BJ), обеспечивающего наилучшее соотношение точности и вычислительных затрат.

Ключевые слова: DFT, VASP, точечные дефекты, вакансия, энергия образования, кремний, α-кварц, суперячейка, электронная структура.

I. ВВЕДЕНИЕ

Точечные дефекты типа «вакансия» в конструктивных материалах приборных структур микроэлектроники – кристаллическом кремнии и α-кварце – существенно влияют на электрофизические характеристики устройств, выступая в роли ловушек, рекомбинационных центров или источников изменения типа проводимости [1]. Для прогнозирования поведения таких дефектов необходимы количественные данные об их энергии образования, получаемые методами теории функционала плотности (DFT) [2]. Однако результаты DFT-расчетов существенно зависят от выбора обменно-корреляционного функционала, размера суперячейки и схемы интегрирования по зоне Бриллюэну, что требует систематической валидации методики. Целью настоящей работы являлось определение энергии образования нейтральных вакансий в кремнии и α-кварце с использованием программного пакета VASP и оценка влияния дефектов на электронную структуру данных материалов.

II. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Для выполнения квантово-механических расчетов структурных и электронных свойств использовался программный пакет VASP (Vienna Ab initio Simulation Package). Для учета обменно-корреляционного потенциала выбраны аппроксимация локальной плотности (LDA), приближение обобщенного градиента в параметризации Пердью–Бюрке–Эрнцерхофа (GGA-PBE), а также GGA в сочетании со схемой дисперсионной коррекции Грима и поправками Бекке–Джонсона (PBE-D3(BJ)). Установлено, что PBE-D3(BJ) дает наилучшее соотношение между точностью и вычислительными затратами. Для кремния и кварца не требуется введение Hubbard-коррекции (U), так как отсутствуют сильнокоррелированные d- и f-электроны.

Для бездефектных кристаллов кремния (Si) и α-кварца (SiO_2) определены основные параметры моделирования. Энергия обрезания плоских волн выбрана равной 500–600 эВ на основе тестовых расчетов по сходимости. Критерий сходимости по энергии между двумя шагами самосогласования установлен не хуже 10^{-6} эВ. Интегрирование в импульсном пространстве осуществлялось по сетке k-точек, сгенерированной по Г-схеме: для кремния с кубической решеткой использовалась сетка 8×8×8, для тригонального кварца – 6×6×4. Электронные волновые функции описывались базисным набором плоских волн с использованием проекторно-дополненных волн (PAW-псевдопотенциалы). Для кремния конфигурация валентных оболочек принималась как $3s^2 3p^2$, для кислорода – $2s^2 2p^4$. Статические самосогласованные расчеты выполнялись с привлечением метода тетраэдра с поправками Блоха.

Создана элементарная ячейка кремния с алмазной структурой, содержащая два атома. Проведена оптимизация геометрии и рассчитаны равновесная постоянная решетки, объемный модуль упругости и полная энергия основного состояния. Выполнены зонные расчеты с построением энергетических диаграмм вдоль высокосимметричных направлений зоны Бриллюэна: Г→X→U→K→Г→L→W→X. Определено, что исследуемый кремний является непрямозонным полупроводником с шириной запрещенной зоны 0,72 эВ.

Проведено аналогичное моделирование бездефектного α-кварца. Создана элементарная ячейка α-SiO_2 тригональной сингонии (пространственная группа $P32_21$), содержащая три формульные единицы (9 атомов). Проведена оптимизация параметров решетки a и c, а также внутренних координат атомов. Рассчитана зонная структура вдоль пути Г→M→K→Г→A→L→H→A. Установлено, что кварц

является широкозонным диэлектриком с шириной запрещенной зоны 6,88 эВ. Также рассчитаны плотности состояний (полная и парциальная) для анализа вкладов Si и O в валентную зону и зону проводимости.

Проведено моделирование точечных дефектов типа «вакансия». Для исследования дефектов описаны суперячейки: для кремния – 2×2×2, содержащая 64 атома, для кварца – 2×2×2, содержащая 72 атома. Вакансии создавались удалением одного атома из суперячейки: в кремнии удаляется атом Si; в кварце отдельно рассматривались вакансия кремния и вакансия кислорода. После удаления атома проведена дополнительная оптимизация структуры (релаксация) для определения наиболее стабильных положений оставшихся атомов в квазиобъемной структуре с дефектом. Интегрирование в импульсном пространстве для суперячеек выполнялось по сетке k-точек 4×4×4 для кремния и 4×4×2 для кварца. Для определения энергии образования точечных дефектов используется формула:

$$E_V = E_{def} - E_O + n_i \cdot \mu_V, \quad (1)$$

где E_{def} – энергия суперячейки с дефектом, E_O – энергия бездефектной суперячейки того же размера, n_i – число удалённых атомов (равно 1), μ_V – химический потенциал удалённого атома.

Для каждой суперячейки с вакансией рассчитаны следующие характеристики: изменение постоянной кристаллической решетки (или параметров ячейки) относительно бездефектного состояния, зонная диаграмма и плотность состояний. Проведен анализ появления дефектных (ловушечных) уровней в запрещенной зоне, их положение относительно дна зоны проводимости и потолка валентной зоны. Установлено, что для кварца с вакансией кислорода характерно появление донорных уровней вблизи зоны проводимости, а для вакансии кремния в кварце – глубоких акцепторных уровней. В кремнии вакансия приводит к появлению уровней в середине запрещенной зоны и изменению типа проводимости на p-тип.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполненного квантово-механического моделирования методом DFT (PBE-D3(BJ)) рассчитаны энергии образования нейтральных вакансий, которые составили 3,85 эВ для кристаллического кремния, 5,12 эВ для вакансии кислорода и 9,45 эВ для вакансии кремния в α-кварце. Анализ электронной структуры показал, что вакансия кислорода в кварце формирует донорный уровень на 1,15 эВ ниже дна зоны проводимости, вакансия кремния в кварце создает глубокий акцепторный уровень на 2,40 эВ выше потолка валентной зоны, а вакансия в кремнии генерирует уровень вблизи середины запрещенной зоны (на 0,38 эВ выше валентной зоны), способствуя появлению p-типа проводимости. Релаксация кристаллической решетки вокруг дефектов приводит к локальному изменению объема суперячеек на -1,2 % для Si и +0,8 % для SiO_2. Установленные количественные закономерности подтверждают, что исследуемые дефекты выступают в роли эффективных ловушек и рекомбинационных центров, а полученные численные данные могут быть непосредственно использованы при проектировании элементов памяти, датчиков и солнечных элементов наноэлектроники на основе кремния и кварца без привлечения дорогостоящих натурных экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Van de Walle, C. G., & Neugebauer, J. (2004). First-principles calculations for defects and impurities in semiconductors. Journal of Applied Physics, 95(8), 3851-3879.

[2] McKenna, K. P., & Shluger, A. L. (2009). Oxygen vacancy in α-quartz. Physical Review B, 79(24), 245116.

DETERMINATION OF THE FORMATION ENERGY OF VACANCY-TYPE POINT DEFECTS IN STRUCTURAL MATERIALS OF SILICON-BASED MICROELECTRONIC DEVICE STRUCTURES

K.I. Bulavko, E.E. Usenko, V.E. Pashkevich, D.C. Hvazdouski

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
gvozdovsky@bsuir.by

Abstract: this paper presents the results of quantum mechanical simulation of vacancy-type point defects in crystalline silicon and α-quartz (SiO_2), which serve as structural materials for microelectronic device structures. The calculations were performed using the VASP software package with PAW pseudopotentials and the PBE-D3(BJ) functional, providing the best balance between accuracy and computational cost.

Keywords: DFT, VASP, point defects, vacancy, formation energy, silicon, α-quartz, electronic structure.

УДК 004.65:620.22

АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛА БАЗ ДАННЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ В СОВРЕМЕННЫХ ПЛАТФОРМАХ ДЛЯ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Чураков А.В., Камлач П.В., Онгарбаева А.И.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, anchurakov@bsuir.by

Аннотация: современные базы данных о свойствах материалов составляют цифровые каталоги с физическими, химическими, механическими и термодинамическими природными веществами, газом, тканями и средами биологических объектов. Однако для ряда задач целесообразно использовать единую платформу, поскольку это снижает риск потери данных при переносе моделей и упрощает воспроизводимость расчётов в программном обеспечении, которое содержит в свободной доступе все материалы, необходимые для разработки инновационных технологий, особенно если изучается моделирование электрической характеристики и влияние внешних воздействий на ткани биологических объектов.

Ключевые слова: базы данных о свойствах материалов, MatWeb, Materials Project, Total Materia, COMSOL Multiphisics, SOLIDWORKS, SIM4LIFE SCIECE 9.0 Zurich MedTech AG (ZMT).

ВВЕДЕНИЕ

Современные базы данных свойств материалов – это цифровые каталоги с физическими, химическими, механическими и термодинамическими характеристиками веществ, газов, тканей организмов. Их можно классифицировать как общие и популярные базы данных и специализированные базы данных, привязанных для работы к определенным платформам. Популярные это MatWeb – крупная онлайн-база, содержащая более 200 000 видов материалов, включая металлы, пластики, керамику и полупроводники. Materials Project – научный проект с открытым доступом, который прогнозирует и собирает свойства неорганических соединений для разработки новых технологий. Total Materia – одна из самых полных мировых баз данных по металлам, полимерам и композитам с миллионами записей и диаграмм. Мы проведем краткий сравнительный анализ специализированных баз данных свойств материалов в ведущих платформах для моделирования, в которых реализовано моделирование электрических характеристик и влияния внешних воздействий.

Наиболее применяемая для обучения и работы COMSOL Multiphisics [1,2] имеет встроенную библиотеку, и базовая версия программы с модулями расширения включают свыше 2500 материалов, включая металлы, полимеры, полупроводники, минералы и газы. В течение создания модели свойства необходимого материала достаточно просто найти и подгрузить. Свойства материалов (теплопроводность, плотность, электропроводность, вязкость) могут задаваться как константы, так и как функции от температуры, давления или других параметров. Также интегрированы специализированные базы, и дополнительные модули добавляют профильные базы данных [2]. Например, модуль «Микрофлюидика» включает библиотеку жидкостей и газов (Liquids and Gases), а модули химических реакций поддерживают формат CHEMKIN. Что касается пользовательских материалов: возможно вручную создавать собственные материалы, задавать любые формулы и таблицы свойств, а также сохранять их в личную или корпоративную базу данных [4]. Существенным недостатком является отсутствие свойств материалов тканей биологических объектов и организма человека и использует только все доступные физические ядра центрального процессора (CPU) по умолчанию для ускорения расчетов. Второе активно применяемое в работе и обучении это программное обеспечение SOLIDWORKS. Оно предоставляет обширную базу, необходимых для расчета, данных по свойствам материалов, которую, в случае необходимости, очень просто дополнить новыми материалами [3]. Доступна обширная база материалов с физическими свойствами – металлов, сплавов, пластиков и т.д. Однако все поля свойств материалов отображаются серым цветом и недоступны для редактирования (рисунок 1).

Несмотря на наличие обширной базы материалов в SOLIDWORKS, возникает ситуация, когда необходимо создать материал со свойствами, отличающимися от материалов из базы SOLIDWORKS. По умолчанию база данных материалов закрыта для редактирования пользователями. Если вы являетесь пользователем услуг по подписке SOLIDWORKS с лицензией SOLIDWORKS Simulation, доступ к веб-порталу материалов SOLIDWORKS можно получить из диалогового окна Материал. Веб-портал материалов SOLIDWORKS представляет собой обширную базу материалов, поддерживаемую компанией Matereality LLC. Свойства материалов тестируются компанией Matereality LLC и

проверяются с помощью опубликованных исследований и каталогов, поставляемых различными поставщиками материалов. База данных доступна для поиска по типу исследования моделирования и модели материала. Замечательно то что свойства материалов, загружаемых с веб-портала SOLIDWORKS Materials, можно редактировать. Для исследований усталости, когда загружены данные кривых S-N, Simulation преобразует полученные максимальные значения напряжения в переменные напряжения. Данные кривой S-N хранятся в программе Simulation в формате *.sldmat. Для вязкоэластичных материальных моделей, когда загружены данные соотношения модуля расслабления (G) и кривой времени, Simulation сохраняет только данные кривой, меньшие, чем заданное значение модуля сдвига. Однако есть и следующие недостатки, которые ограничивают применение. Доступ к веб-порталу материалов SOLIDWORKS доступен только пользователям услуг по подписке SOLIDWORKS, имеющим лицензию SOLIDWORKS Simulation Professional или лицензию SOLIDWORKS Simulation Premium. Частично доступен пользователям услуг по подписке SOLIDWORKS, имеющим лицензию SOLIDWORKS Simulation Standard. Эти клиенты могут только скачать материалы со свойствами линейного статического анализа и исследования усталости (ограниченный набор полного набора доступных материалов). Также недостатком является то, что пользователям услуг по подписке недоступен SOLIDWORKS, имеющим только лицензию SOLIDWORKS (SOLIDWORKS Standard, SOLIDWORKS Professional или SOLIDWORKS Premium) [3,5].

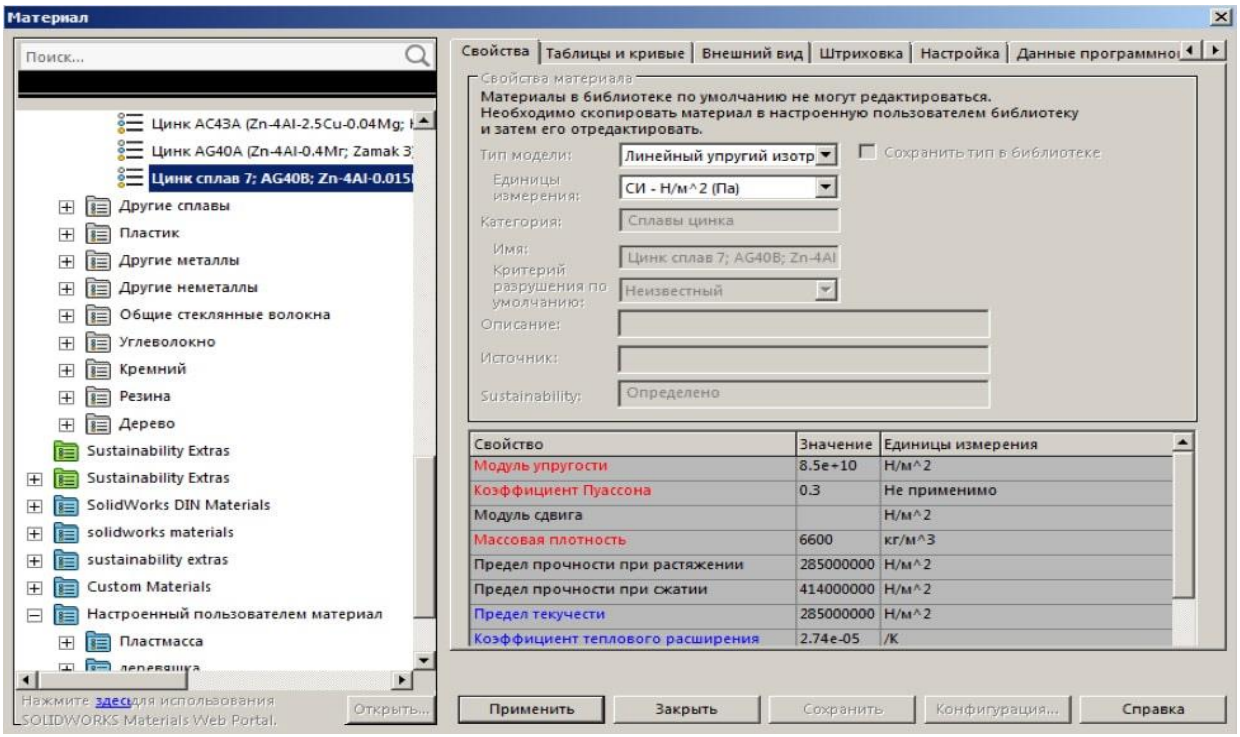


Рисунок 1. Интерфейс выбора материала в SOLIDWORKS

Остановимся на функционале платформы SIM4life Zurich MedTech AG (ZMT) с которыми наш университет успешно сотрудничает последние 8 лет. База материалов в Sim4Life – это интегрированная библиотека физических свойств тканей и инженерных материалов. Её основу составляет база данных свойств биологических тканей IT'IS Foundation (IT'IS Tissue Properties Database), которая является широко используемым и регулярно обновляемым источником рекомендованных параметров биологических тканей для биомедицинских вычислений и моделирования. База данных автоматически сопоставляет физические параметры с анатомическими моделями из библиотек Virtual Population (ViP) и Virtual Zoo (ViZoo) (рисунок 2) [6,7].

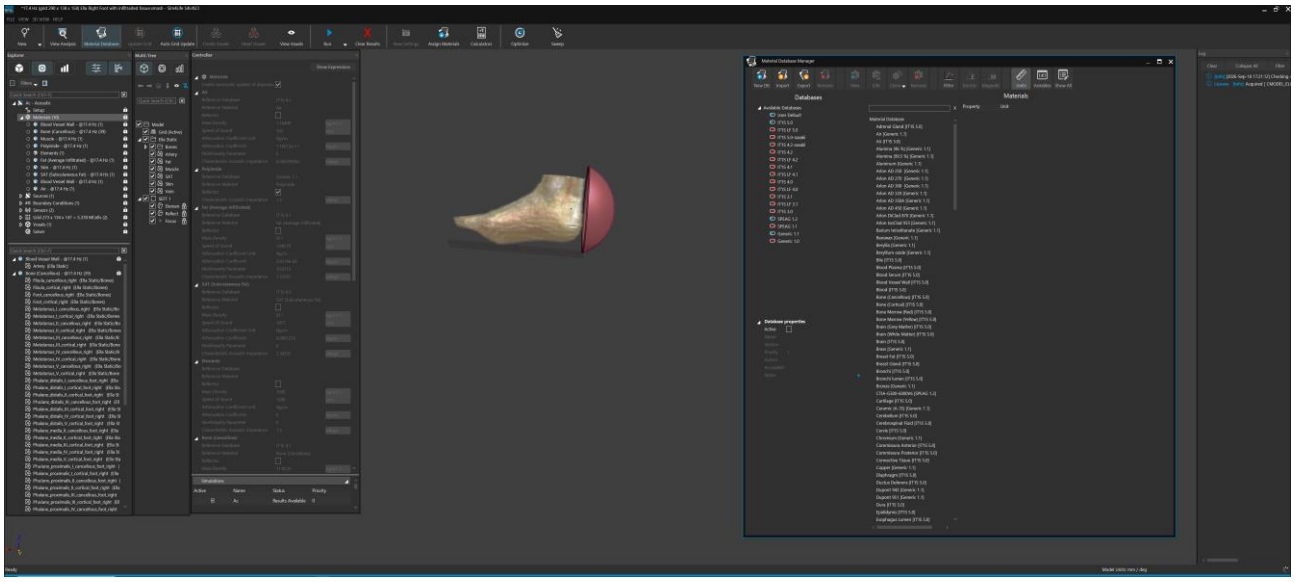


Рисунок 2. Интерфейс выбора материала в SIM4LIFE SCIECE 9.0

Библиотека содержит регулярно обновляемые параметры для более чем 100 типов биологических тканей и различных материалов. Это электромагнитные свойства: диэлектрическая проницаемость, тангенс угла потерь, проводимость и магнитная проницаемость. Поддерживаются частотно-зависимые (дисперсионные) модели Дебая, Лоренца и Друде для широкополосных расчетов методом конечных разностей во временной области (FDTD). Тепловые свойства: теплоемкость, теплопроводность и скорость метаболического тепловыделения. Свежие версии (начиная с Tissue DB V5.0 в Sim4Life V9.0) также содержат данные о массовой доле воды в тканях, что критически важно для точного температурного моделирования. Содержит следующие гидродинамические и перфузионные параметры: константы перфузии крови для моделирования терморегуляции по уравнению Пеннеса. Акустические свойства: скорость звука, плотность и коэффициенты затухания для симуляции ультразвукового воздействия (например, HIFU). Механические свойства: плотность массы и параметры упругости. Инженерные материалы: помимо биологических тканей, база включает характеристики проводников, диэлектриков, метаматериалов и специализированных сред (например, тестовых жидкостей-фантомов SPEAG для оценки SAR). Ключевые инструменты управления материалами является Material Database Manager: это встроенный менеджер, позволяющий переключаться между версиями баз (например, низкочастотными и высокочастотными наборами данных), редактировать существующие и создавать собственные (Custom) материалы. В платформе реализован инструмент DISPFIT (GA-Based Dispersive Fitting Tool): модуль аппроксимации на базе генетических алгоритмов. Он позволяет импортировать текстовые файлы с экспериментальными измерениями и автоматически строить гладкие частотно-зависимые кривые для симулятора. Можно производить вычисления анизотропия на основе MPT: Sim4Life поддерживает импорт карт тензора диффузии (DTI) для назначения анизотропной электропроводности (например, в тканях головного мозга или мышцах). Для расширенной информации о структуре данных или загрузить автономные файлы базы (в форматах Excel, ASCII или .db для ручного импорта) можно напрямую на официальном сайте IT'IS Foundation [6,7]. Крайне важно, что вычисления сложных математических расчетах фактически во всех решателях проводятся и выполняются с помощью технологию CUDA для графических процессоров NVIDIA. GPU-ускорение может сделать возможным выполнение демонстрационных или учебных расчётов в ограниченное время; фактическая длительность зависит от сложности задачи и аппаратной конфигурации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ баз данных позволяется сделать следующие выводы. Онлайн-базы данных существенно различаются по охвату материалов, составу параметров, условиям лицензирования и возможностям интеграции с CAE-платформами химической промышленности и радиоэлектроники, и формат данных проблематично использовать в платформах для моделирования. Платформы Стандартные библиотеки COMSOL и SOLIDWORKS ориентированы прежде всего на инженерные материалы и не предоставляют столь же специализированной и тесно интегрированной базы параметров биологических тканей, как Sim4Life и для отдельных специализированных материалов и биологических сред может потребоваться самостоятельный ввод, верификация или импорт параметров, что в полной мере не позволяют проводить сложные математические вычисления

электрических характеристик и влияние внешних воздействий на фантомах биологических объектов, т.к. не поддерживают технологию CUDA для графических процессоров NVIDIA. Все задачи по изучению влияния внешних воздействий, моделирование источников различных внешних воздействий, прототипов приборов, вычисление и анализ результатов моделирования в реальном времени целесообразно делать в SIM4life, чьи базы данных материалов наиболее полные и содержат максимум информативности для научных коллективов, а поддержка CUDA-ускорения может существенно сократить время расчёта при сохранении заданной точности, определяемой моделью и настройками численного решения, делает научно-практические работы и процесс обучения высокопроизводительными.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы благодарят руководство Zurich MedTech AG (ZMT) за предоставленное программное обеспечение и поддержку.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Чураков, А. В. Принципы моделирования и проектирования приборов магнито- и ультразвуковой терапии : учеб.-метод. пособие / А. В. Чураков. – Минск : БГУИР, 2019. – 147 с. : ил. – ISBN 978-985-543-453-6.

[2] Чураков, А. В. Современное программное обеспечение и основные методологические подходы для мультифизического моделирования медицинских и биологических исследований / А. В. Чураков // Инновационные технологии в медицине. – 2018. – Т. 6, № 3. – С. 250–258.

[3] SOLIDWORKS Resource Center [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.solidworks.com/ru/support/resource-center. – Дата доступа: 19.09.2026.

[4] Introduction to COMSOL Multiphysics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cdn.comsol.com/doc/5.4/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.ru_RU.pdf. – Дата доступа: 19.09.2026.

[5] SOLIDWORKS Simulation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.solidworks.com/product/solidworks-simulation. – Дата доступа: 19.09.2026.

[6] Sim4Life: Science [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://sim4life.swiss/science. – Дата доступа: 19.09.2026.

[7] Sim4Life: Anatomical Device Modeling [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://sim4life.swiss/use-cases/anatomical-device-modeling. – Дата доступа: 19.09.2026.

ANALYSIS OF THE FUNCTIONALITY OF MATERIAL PROPERTIES DATABASES IN MODERN PLATFORMS FOR PHYSICAL-MATHEMATICAL SIMULATION

A.V. Churakov, P.V. Kamlach, A.I. Ongarbayeva

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
anchurakov@bsuir.by

Abstract: modern databases on material properties comprise digital catalogues of the physical, chemical, mechanical and thermodynamic properties of natural substances, gases, tissues and biological media. However, the optimal approach is to carry out single-platform modelling and solve all problems within a single software package that provides open access to all the materials required for the development of innovative technologies, particularly when modelling the electrical characteristics and the influence of external factors on the tissues of biological objects.

Keywords: material property databases, MatWeb, Materials Project, Total Materia, COMSOL Multiphysics, SOLIDWORKS, SIM4LIFE SCIENCE 9.0, Zurich MedTech AG (ZMT).

УДК 544.65

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОРИСТОГО ОКСИДА ВОЛЬФРАМА С ТЕРМИТНОЙ СТРУКТУРОЙ НА УДЕЛЬНУЮ ВНУТРИПОРОВУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

Лазарук С.К., Дудич В.В., Томашевич Л.П., Иванюта С.М., Ионов М.И, Духовников А.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, lazaruk@bsuir.by

Аннотация: электрохимическое анодирование вольфрама позволяет получать пленки пористого оксида вольфрама со структурой близкой к структуре термитника. Пленка состоит из гексагональных ячеек, в центре которых расположены поры с внешней поверхностью, имеющей форму вытянутого эллипсоида. Приведены формулы, позволяющие рассчитывать пористость сформированных оксидов и их удельную площадь поверхности на основе размерных параметров гексагональных ячеек, к которым следует отнести межпоровое расстояние, высоту гексагональной ячейки, полуоси эллипсоида в вертикальном и горизонтальном направлениях. Расчеты показали, что максимальная удельная площадь поверхности пористого оксида с термитной структурой наблюдается при пористости 60,5%.

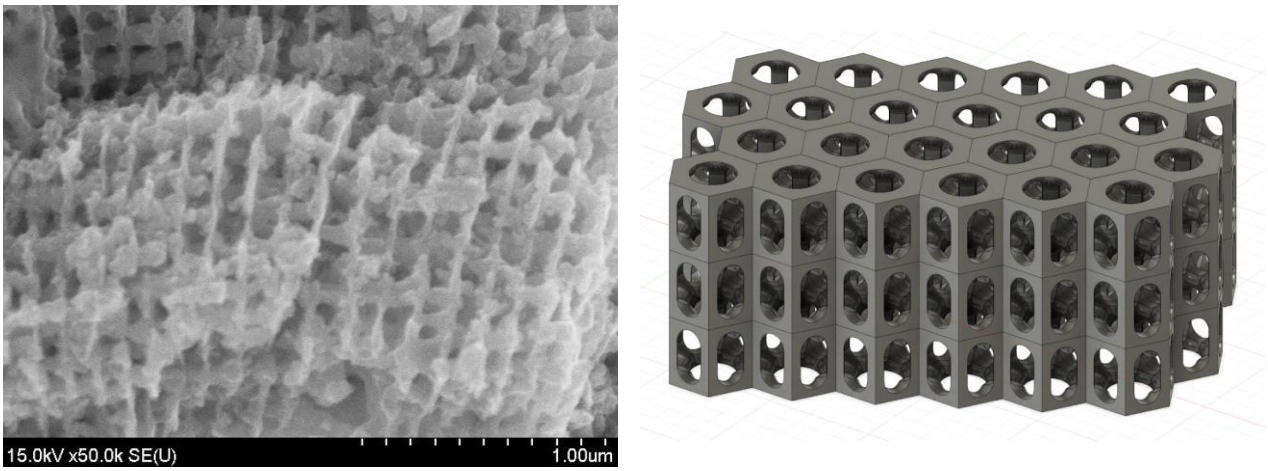
Ключевые слова: электрохимическое анодирование, оксид вольфрама, удельная площадь поверхности.

I. ВВЕДЕНИЕ

Плёнки пористых оксидов вентильных металлов таких как алюминий, титан, вольфрам, ниобий используются в качестве функциональных компонентов интегральной электроники [1, 2]. На основе этих плёнок формируются диэлектрические слои [3, 4], светопроводящие светопоглощающие структуры [5, 6], фотоаноды для электрохимического разложения воды на водород и кислород [7], формозадающие матрицы для темплатного синтеза [8]. Оксид вольфрама среди этих материалов обладает важными преимуществами из-за его ширины запрещённой зоны, что позволяет поглощать свет видимого диапазона и увеличивать эффективность электрохимического разложения воды для получения “зелёного” водорода [7]. В данной работе приведены результаты исследования по формированию пористого оксида вольфрама с термитной структурой и влиянию размерных параметров пористого оксида вольфрама на его удельную внутрипоровую поверхность.

II. ЭКСПЕРИМЕНТ

Плёнки пористого оксида вольфрама формировали электрохимическим анодированием в 0,1% в водном растворе NaCl при напряжении 100 В при плотности анодного тока 80 мА/см^2 в течение 10-20 минут. Структуру сформированного оксида исследовали при помощи электронной и оптической микроскопии. Структурные параметры пористых плёнок и их пористость изменяли за счёт химического травления пористых структур в 1% водном растворе HF.



а б

Рисунок 1. а) фотография электронного микроскопа поперечного сечения пористого оксида вольфрама со структурой термитника, (б) схематическое изображение структуры термитника

III. РЕЗУЛЬТАТЫ

Плёнки пористых оксидов вентильных металлов, сформированных электрохимическим анодированием, имеют структуру типа пчелиных сот, состоящих из гексагональных ячеек с порой в центре [9, 10]. На рисунке 1а представлена фотография электронного микроскопа поперечного сечения пористого оксида вольфрама, сформированного в процессе анодирования. На рисунке 1б представлено схематическое изображение полученной структуры. Как видно из рисунков плёнка состоит из ячеек в форме гексагональных призм в центре которых расположена пора, поверхность которой имеет форму вытянутого эллипсоида (рисунок 1а). Данная форма внутрипоровой поверхности отличается от аналогичной поверхности других оксидов вентильных металлов, которые имеют форму цилиндра. Это отличие обеспечивает оригинальную структуру плёнок пористого оксида вольфрама, которая аналогична структуре термитника. Характерной особенностью данной структуры является наличие пор как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении, что показано на рисунке 1 а, б. Данное отличие обеспечивает ряд преимуществ термитной структуры по отношению к структурам с цилиндрическими порами. Наличие вертикальных и горизонтальных внутрипоровых поверхностей обеспечивает более эффективное поглощение света, что важно при их использовании в качестве фотоанодов при разложении воды под действием солнечного света. При этом пористость и удельная внутренняя поверхность таких структур может регулироваться за счет изменения размерных параметров гексагональных ячеек. К таким параметрм относятся межпоровое расстояние (D) (горизонтальный размер ячейки), высота гексагональной ячейки (H), полуоси эллипсоида в горизонтальном (c) и вертикальном (a) направлениях.

Пористость термитных структур может быть рассчитана по формуле:

$$\varepsilon = \frac{V_{pores}}{V_{cell}} = \frac{\frac{4}{3}\pi a c^2}{\frac{\sqrt{3}}{2}D^2 H} \quad (1)$$

где V_{pores} – объем поры, V_{cell} – объем ячейки

Удельная внутрипоровая поверхность термитных структур рассчитывалась по формуле:

$$C_{\text{уд}} = \frac{S_{pores}}{V_{cell}} = \frac{S_{el}}{V_{cell}}\ K \quad (2)$$

где S_{pores} – внутрипоровая поверхность гексагональной ячейки (поверхность эллипсоида), K – количество гексагональных ячеек в единице объема

Внутрипоровая поверхность эллипсоида рассчитывалась по формуле Кнуда:

$$S_{el} = 2\pi a^2 + 2\pi \frac{ac}{e}\arcsin(e), \quad (3)$$

где $e = \sqrt{1 - \frac{c^2}{a^2}}$.

Следовательно, на основе размерных параметров пористого оксида вольфрама с термитной структурой (a, c, D, H) можно рассчитать пористость и удельную площадь поверхности. Результаты расчета представлены на рисунке 2.

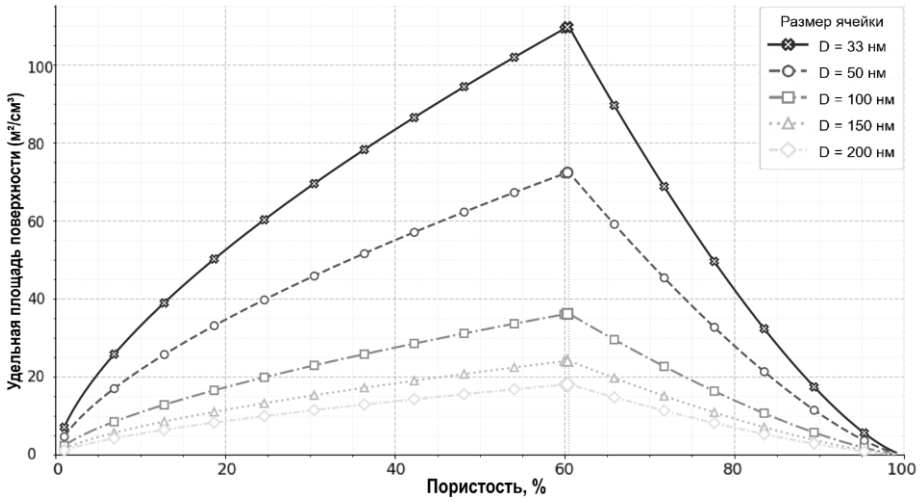


Рисунок 2. График зависимости удельной поверхности пористых пленок с гексагональной термитной структурой от размерных параметров составляющих их ячеек

Как видно из рисунка 2 удельная поверхность увеличивается при уменьшении межпорового расстояния (размера ячейки) и достигает максимального значения при увеличении диаметра пор и уменьшении межпорового расстояния. При этом максимальное значение удельной поверхности достигается при пористости около 60.5 %. Достигнутый уровень удельной поверхности пористого оксида с гексагональной структурой около 109.75 $м^2/см^3$ представляет интерес для пористых материалов используемых в качестве фотокатализаторов химических реакций, например, пористый оксид вольфрама можно использовать для очистки воды от органических загрязнений, а также от микропластика [11], что очень важно для решения существующих экологических проблем современности.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные нами исследования показали, что за счет изменения размерных параметров пористого оксида вольфрама с термитной структурой можно регулировать пористость формируемых структур и удельную внутрипоровую поверхность. Также следует отметить, что пористые структуры могут быть использованы при изготовлении пленочных фотоанодов для разложения воды на кислород и водород под действием солнечного света [7]. Контролируемое управление пористостью может также использоваться при формировании многослойных световодных структур с сердцевиной, обладающей повышенным показателем преломления за счет более низкой пористости внутреннего слоя [12-16]. Пористые структуры с высокой пористостью могут быть использованы в качестве антиотражающих покрытий на металлических поверхностях в фотоэлектрических и фототепловых преобразователях солнечной энергии [17] и в других оптоэлектронных устройствах интегральной микроэлектроники [18-20].

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ проект № Т25ИНДА-004 (Формирование антиотражающих покрытий) и БРФФИ-Минобразование М проект № Т26МВ-026 (Исследование антиотражающих свойств пористых оксидов).

ЛИТЕРАТУРА

[1] Lazarouk, S. Electrical characterization of visible emitting electroluminescent Schottky diodes based on n-type porous silicon and on highly doped n-type porous polysilicon / S. Lazarouk, V. Bondarenko, P. Jaguiro et al. // Journal of Non-Crystalline Solids. – 1996. – Vol. 198. – P. 973-976.

[2] La Monica, S. Characterization of porous silicon light emitting diodes in high current density conditions / S. La Monica, M. Balucani, S. Lazarouk, G. Maiello, G. Masini, P. Jaguiro, et al. // Solid State Phenomena. – 1997. – Vol. 54. – P. 21-26.

[3] Lazarouk, S. Anodic Nanoporous Titania for Electro-optical Devices / S. Lazarouk, Z. Xie, V. Chigrinov, H.S. Kwok // Japanese Journal of Applied Physics. – 2007. – Vol. 46 (7A). – P. 4390–4394.

[4] Lazarouk, S. Porous alumina as low-ε insulator for multilevel metallization / S Lazarouk, S Katsouba, A Leshok, A Demianovich, V Stanovski, S Voitech, V. Vysotski, V. Ponomar // Microelectronic Engineering. – 2000. – Vol. 50 (1-4). – P. 321-327.

[5] Buzaneva, E. Photophysical properties of nano Si/SiOx composites in Al/composite/mono Si structures for green light emitting and photodetector-Schottky diodes / E. Buzaneva, A. Gorchinsky, G. Popova, T. Veblaya, S. Zankovych, S. Boiko, et al. // Materials Science in Semiconductor Processing. – 2000. – Vol. 3 (5-6). – P. 529-537.

[6] Lazarouk, S.K. Room-temperature formation of erbium-related luminescent centers in anodic alumina / S.K. Lazarouk, A.V. Mudryi, V.E. Borisenko // Applied physics letters. – 1998. – Vol. 73 (16). – P. 2272-2274.

[7] Chatterjee, P. Stable Solar Water Splitting Enabled in Anodic W/WO_3 Nanorod Based Electrodes by Hydrothermal Engineering / P. Chatterjee et al. // Applied Nanomaterials. – 2025. – Vol. 8. – P. 18990-19000.

[8] Nguyen, J. Effect of flattened surface morphology of anodized aluminum oxide templates on the magnetic properties of nanoporous Co/Pt and Co/Pd thin multilayered films / J. Nguyen, J. Fedotova, J. Kasiuk, V. Bayev, O. Kupreeva, S. Lazarouk, D.H. Manh, D.L. Vu, S. Chung, J. Akerman, V. Altynov, A. Maximenko // Applied Surface Science. – 2018. – Vol. 427. – P. 649-655.

[9] Lazarouk, S.K. Formation of Alumina Nanotubes and Jet Effect during High-Voltage Local Anodization of Aluminum / S.K. Lazarouk, D.A. Sasinovich, V.V. Dudich, A.S. Lazarouk, V.E. Borisenko // Advanced Engineering Materials.– 2022. – Vol. 24 (1). – P. 2100691.

[10] Lazarouk, S.K. High Field Porous Anodization of Aluminium Films with a Photolithographic Mask / S.K. Lazarouk // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures. World Scientific Press. – 2013. – P. 355–358.

[11] Liang, K. Fabrication of double-walled titania nanotubes and their photocatalytic activity / K. Liang, B. K. Tay, O. V. Kupreeva, T. I. Orekhovskaya, S. K. Lazarouk, V. E. Borisenko // ACS Sustainable Chemistry & Engineering.– 2014. – Vol. 2 (4). – P. 991-995.

[12] Jaguiro, P. Si-based optoelectronic couple / P. Jaguiro et al. // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. – 2009. – Vol. 41 (6). – P. 1094-1096.

[13] Jaguiro, P. Si-based emissive microdisplays / P. Jaguiro, P. Katsuba, S. Lazarouk, M. Farmer, A. Smirnov // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. – 2009. – Vol. 41 (6). – P. 927-930.

[14] Jaguiro, P. Porous silicon avalanche LEDs and their applications in optoelectronics and information displays / P Jaguiro, P Katsuba, S Lazarouk, A Smirnov // Acta Physica Polonica A. – 2007. – Vol. 112 (5). – P. 1031-1036.

[15] Dolbik, A.V. Optical Properties of Transparent Conducting Coatings Based on an Aluminum Grid Embedded in Anodic Aluminum Oxide / A.V. Dolbik, D.A. Sasinovich, S.M. Zavadskii, D.A. Golosov, M.V. Meledina, G.G. Rabatuev, S.K. Lazarouk // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2025. – Vol. 61 (3). – P. 333-337.

[16] Berashevich, J.A. Electroluminescence in porous silicon at a reverse bias voltage applied to the Schottky barrier / J.A. Berashevich, S.K. Lazarouk, V.E. Borisenko // Semiconductors. – 2006. – Vol. 40 (2). – P. 234-239.

[17] Лазарук, С.К. Формирование трубчатых оксидов алюминия локальным электрохимическим анодированием в органических электролитах и их антиотражающие свойства / С.К. Лазарук, В.В. Дудич, Т.И. Ореховская, Д.А. Сасинович, Л.П. Томашевич, А.А. Устименко, А.А. Повжик, Н.А. Каланда, Д.А. Симоненко, С.М. Иванюта // Доклады БГУИР. – 2023. – Т. 21 (6). – С. 21-28.

[18] Lazarouk, S.K. Nanoporous oxides of refractory metals: fabrication and properties / S.K. Lazarouk, D.A. Sasinovich, V.E. Borisenko // Physica Status Solidi C. – 2008. – Vol. 5 (12). – P. 3690-3693.

[19] Lazarouk, S. Stable electroluminescence from reverse biased n-type porous silicon-aluminum Schottky junction device / S. Lazarouk, et al. // Applied Physics Letters. – 1996. – Vol. 68 (15). – P. 2108-2110.

[20] Balucani, M. Silicon emitting device will knock down communication bottleneck? / M Balucani, et al. // Solid State Phenomena. – 1997. – Vol.54. – P. 8-12.

INFLUENCE OF DIMENSIONAL PARAMETERS OF POROUS TUNGSTEN OXIDE WITH A THERMITE-LIKE STRUCTURE ON SPECIFIC INTRA-PORE SURFACE AREA

Lazarouk S.K., Dudich V.V., Tomashevich L.P. Ivanyuta S.M., Ionov M.I., Dukhovnikov A.V.

[1]Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
lazaruk@bsuir.by

Abstract: electrochemical anodization of tungsten enables the production of porous tungsten oxide films with a structure resembling that of a termite mound. The film consists of hexagonal cells (hexagonal prisms) containing central pores with an outer surface shaped like an elongated ellipsoid. Formulas are presented for calculating the porosity and specific internal surface area of the formed porous oxides based on the dimensional parameters of the hexagonal cells, specifically the interpore distance, cell height, and the vertical and horizontal semi-axes of the ellipsoid. Calculations indicate that the maximum specific surface area for porous oxide with a termite-mound structure is achieved at a porosity of 60.5%.

Keywords: anodization, porous films, tungsten oxide, specific surface area.

УДК 539.2

ДЕФЕКТНО-ПРИМЕСНЫЕ КОМПЛЕКСЫ В МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПЕРОВСКИТНЫХ ТИТАНАТАХ

Хорошко Л.С.[1,2], Баглов А.В.[1,2]

[1]Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь, khoroshko@bsu.by

[2]Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь

Аннотация: методами теории функционала плотности исследованы дефектно-примесные комплексы в титанатах $SrTiO_3$ и $BaTiO_3$, содержащие лантаноиды, углеродные кластеры и вакансии решётки. Для выбранных конфигураций проведены геометрическая оптимизация, сравнение энергетической устойчивости и анализ электронной структуры. Показано, что относительное расположение углеродного кластера и вакансии кислорода влияет на локальную релаксацию и распределение электронных состояний. В рассмотренных моделях ассоциация углеродных включений с вакансиями оказывается энергетически предпочтительнее ряда альтернативных конфигураций того же состава.

Ключевые слова: перовскиты; титанаты; лантаноиды; вакансии; углеродные кластеры.

I. ВВЕДЕНИЕ

Перовскитные титанаты стронция и бария представляют собой перспективные кристаллические матрицы, функциональные свойства которых существенно зависят от состава, локального координационного окружения и дефектного состояния. Одновременное внедрение лантаноидов и углеродных включений, сопровождающееся образованием собственных вакансий, приводит к формированию множества возможных локальных конфигураций даже при фиксированном химическом составе матрицы. Поскольку энергетическая устойчивость и электронная структура таких систем не могут быть однозначно предсказаны исходя только из перечня легирующих компонентов, необходим детальный анализ конкретных атомных конфигураций. Целью настоящей работы являлось сопоставление структурных, энергетических и электронных характеристик дефектно-примесных комплексов в $SrTiO_3$ и $BaTiO_3$ с учётом взаимного пространственного расположения лантаноидной примеси, углеродного кластера и вакансий решётки с использованием моделирования объёмных сверхъячеек; экспериментальная верификация рассмотренных конфигураций в рамках данной работы не проводилась.

II. РАСЧЁТНЫЕ МОДЕЛИ И МЕТОДИКА

Атомно-кристаллические модели, построенные на базе сверхъячеек $SrTiO_3$ и $BaTiO_3$, включали замещение катионов лантаноидами, внедрение углеродных кластеров (включая C_3) и образование вакансий кислорода (V_O) или титана (V_{Ti}). Пространственная конфигурация комплекса варьировалась для оценки влияния взаимного расположения компонентов, при этом тип вакансии задавал уникальную дефектную структуру, неразрывно связанную с позицией и зарядовым состоянием примеси. Первопринципные расчёты проводились в рамках теории функционала плотности (density functional theory, DFT) с использованием программных комплексов CASTEP [1] и OpenMX [2]; для учёта корреляционных эффектов в Ti-3d- и Ln-4f-оболочках использовался подход DFT+U [3] с параметрами U = 4,5 эВ (Ti) и 6,0–7,0 эВ (Ln). После геометрической оптимизации рассчитывались электронные характеристики и относительная устойчивость конфигураций при неизменном составе.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Геометрическая оптимизация выявила существенную локальную перестройку перовскитной решётки в области дефектно-примесных комплексов. Изменения длин связей и координационного окружения затрагивают ближайшие TiO_6-октаэдры, причём характер искажений определяется не только составом комплекса, но и взаимным пространственным расположением его компонентов. Это подтверждает необходимость полной геометрической релаксации сверхъячейки для корректного сопоставления различных дефектных конфигураций.

Энергетический анализ структур с одинаковым набором атомов показал, что предпочтительными являются конфигурации, в которых углеродные включения ассоциированы с собственными дефектами решётки. В частности, расположение кластера C_3 вблизи кислородной вакансии V_O изменяет его координационное окружение и снижает полную энергию системы по сравнению с альтернативными вариантами размещения. Данное заключение справедливо для исследованного подмножества

конфигураций; его обобщение на произвольные формы углеродных включений в титанатной матрице требует дополнительного учёта термодинамических условий и более полного структурного поиска. Аналогично, варианты с различным размещением лантаноида и вакансий демонстрируют заметные различия в энергии после релаксации, что свидетельствует о невозможности определения наиболее выгодной конфигурации и электронного спектра исключительно по номинальному составу. При интерпретации результатов важно разделять сравнение изоморфных конфигураций одного состава и сопоставление различных дефектных состояний, последнее из которых требует задания химических потенциалов атомных резервуаров и, при наличии заряженных дефектов, согласованного учёта положения уровня Ферми.

Анализ полной и парциальных плотностей электронных состояний показал, что формирование дефектно-примесных комплексов существенно модифицирует электронный спектр. Край валентной зоны и зона проводимости формируются преимущественно O-2p- и Ti-3d-состояниями, тогда как Ln-4f- и C-2p-состояния дают дополнительные вклады, энергетическое положение которых чувствительно к локальной геометрии и составу дефектного окружения. Для надёжной идентификации локализованных состояний необходим совместный анализ парциальных плотностей и пространственного распределения электронной плотности. Сопоставление результатов, полученных в двух базисных представлениях, служит дополнительной верификацией качественных выводов о характере релаксации и природе дефектных уровней. При этом количественные расхождения между расчётами не следует относить только к физическим эффектам, поскольку они могут быть обусловлены различиями в псевдопотенциалах, базисных наборах, обменно-корреляционных функционалах и параметрах DFT+U. Это показывает, что энергетическое ранжирование конфигураций должно проводиться строго в рамках единой согласованной вычислительной схемы.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Первопринципное моделирование выявило определяющую роль пространственной конфигурации дефектно-примесных комплексов в локальной релаксации и электронной структуре титанатов $SrTiO_3$ и $BaTiO_3$. Показано, что энергетически предпочтительна ассоциация углеродных включений с вакансиями кислорода, сопровождающаяся перестройкой локализованных состояний примесей. Сформированные структурно-энергетические критерии позволяют обоснованно отбирать конфигурации для дальнейшего расчёта функциональных свойств материалов.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках НИР «Низкотемпературный синтез и свойства наноструктурированных композитов на основе перовскитных соединений с кластерами редкоземельных элементов и углерода для конвертеров оптического излучения и фотовольтаики» подпрограммы «Наноструктуры, наноматериалы и технологии» ГПНИ «Современное материаловедение, перспективные материалы и новые технологии».

ЛИТЕРАТУРА

[1] First principles methods using CASTEP / S. J. Clark [et al.] // Zeitschrift für Kristallographie. 2005. Vol. 220, No. 5–6. P. 567–570. https://doi.org/10.1524/zkri.220.5.567.65075.
[2] Ozaki T. Variationally optimized atomic orbitals for large-scale electronic structures // Physical Review B. 2003. Vol. 67. Art. 155108. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.67.155108.
[3] Electron-energy-loss spectra and the structural stability of nickel oxide: An LSDA+U study / S. L. Dudarev [et al.] // Physical Review B. 1998. Vol. 57. P. 1505–1509. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.57.1505.

DEFECT-IMPURITY COMPLEXES IN MODIFIED PEROVSKITE TITANATES

L. Khoroshko[1,2], A. Baglov[1,2]

[1]Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus, baglov@bsu.by

[2]Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Abstract: density-functional calculations were used to study defect–impurity complexes in $SrTiO_3$ and $BaTiO_3$ containing lanthanides, carbon clusters and lattice vacancies. Selected configurations were geometrically optimized and compared in terms of energetic stability and electronic structure. The relative position of a carbon cluster and an oxygen vacancy affects local relaxation and the distribution of electronic states. Within the models considered, vacancy-associated carbon configurations are energetically favored over some alternative arrangements of the same composition.

Keywords: perovskites; titanates; lanthanides; vacancies; carbon clusters.

УДК 544.653.22

АНАЛИЗ МОРФОЛОГИИ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ ПУТЕМ ПОВТОРНОГО АНОДИРОВАНИЯ В ЭЛЕТКРОЛИТЕ НА ОСНОВЕ ЛИМОННОЙ КИСЛОТЫ

Гутковская А.А., Овчинникова Д.А., Биран С.А., Короткевич А.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, biran@bsuir.by

Аннотация: анодный оксид алюминия широко используется при изготовлении различных изделий микро- и наноэлектроники. При этом, как правило, анодные оксидные пленки модифицируют тем или иным способом в зависимости от конкретного применения. В данной работе представлена недорогая экспресс-методика оценки структуры и морфологии (диаметр пор, толщина барьерного слоя, пористость) пористого анодного оксида алюминия. Она включает дополнительное анодирование в слаборастворяющем электролите (лимонная или борная кислота) (реанодирование) с регистрацией хроновольтамперных характеристик. В работе исследовано влияние выдержки сформированных оксидных пленок в электролитах различного состава. Показано, что напряжение электрохимического пробоя при реанодировании прямо пропорционально толщине барьерного слоя.

Ключевые слова: анодный оксид алюминия; пористые наноструктуры; электрохимическое анодирование; реанодирование; хроновольтамперометрия.

I. ВВЕДЕНИЕ

Анодный оксид алюминия благодаря своим диэлектрическим свойствам и стабильности является подходящим материалом для применения в различных изделиях микро- и наноэлектроники. Ключевым инструментом разработки таких изделий выступает компьютерное проектирование. Однако точность электрофизических свойств готовых изделий определяется входными данными для проектирования. Теоретические расчеты кинетики роста и свойств диэлектрических пленок оксида алюминия часто не учитывают комплексное влияние реальных технологических факторов: неоднородности пористой структуры, флуктуаций толщины, а также зависимости диэлектрической проницаемости и напряжения пробоя от конкретных режимов электрохимического процесса (плотности тока, состава электролита, температуры). Использование усредненных табличных данных вместо реальных ведет к неточностям при моделировании электрофизических характеристик. Для решения этой задачи необходимо использовать экспериментальные данные при компьютерном моделировании. Данные, полученные в процессе анодирования алюминия необходимы для калибровки, верификации и параметризации компьютерных моделей. Точные данные по таким параметрам, как удельная скорость роста оксида, коэффициент пористости, диэлектрическая проницаемость и пробивное напряжение, позволяет повысить точность электрофизических свойств разрабатываемых структур.

Плёнки анодного оксида алюминия имеют гетерогенное строение с областями, содержащими анионы электролита, наибольшая концентрация анионов в стенках и у дна пор. Для модификации структуры анодного оксида используется ряд методик: длительное анодирование, двухстадийное анодирование, «жёсткое» анодирование (высокая плотность тока и напряжение), анодирование с использованием нанолитографии. Вариация режимов анодирования и последующей электрохимической обработки позволяет получать ячейки диаметром от 50 до 600 нм с порами диаметром от 10 до 250 нм и толщиной барьерного слоя от 0 до 1000 нм. Разработка методов модификации анодных оксидных пленок алюминия позволяет расширить области их применения. Основным методом исследования структуры и морфологии оксидных пленок алюминия является электронная микроскопия, которая не позволяет оперативно получить данные о параметрах пленки и также является дорогостоящей. Экспресс методика оценки структурно-морфологических параметров анодных оксидных пленок алюминия при реанодировании в слаборастворяющих анодный оксид электролитах позволяет оценить изменения в структуре и морфологии оксидной плёнки, а также позволяет уменьшить время и сократить затраты на их исследования [1-4].

II. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика исследования структурно-морфологических и электрофизических параметров пористого оксида алюминия основана на снятии хроновольтамперных характеристик при реанодировании в слаборастворяющих анодный оксид электролитах. С помощью хроновольтамперных характеристик можно судить о наличии загрязнений в структуре плёнки пористого анодного оксида алюминия, а также можно определить геометрические параметры поры и ячейки. Исследование свойств пленок анодного оксида алюминия можно разделить на два этапа. На первом этапе осуществляется пористое

анодирование, например, в растворе щавелевой кислоты. Затем образцы подвергаются модификации (отжигу, травлению, облучению и т.д.), после чего проводится повторное анодирование, в слаборастворяющих анодный оксид электролитах, например, в лимонной кислоте, с определением хроноамперных характеристик, по которым можно судить об изменении структуры и морфологии анодных оксидных.

Наличие пиков на начальном анодирования свидетельствует о наличии в структуре оксидной плёнки алюминия анионов. Дальнейший рост кинетики реанодирования характеризует электрохимический пробой барьерного слоя оксидной пленки, по напряжению, при котором он происходит, можно судить о толщине барьерного слоя. О диаметре пор и пористости можно судить по отклонению хроновольтамперной характеристики на участке, после электрохимического пробоя пористой оксидной плёнки, больший ток соответствует большей пористости и, соответственно, большему диаметру пор при том же размере ячейки.

Полученные данные при исследовании позволяют оперативно контролировать свойства модифицированных структур на основе анодного оксида алюминия.

III. ЭКСЕПРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве образцов для исследования структурно-морфологических параметров наноструктурированных пленок пористого оксида алюминия использовали подложки из алюминиевой фольги А99 толщиной 100 мкм. Перед проведением исследований поверхность подложек очищали от органических загрязнений с использованием ацетона. Далее для выравнивания поверхности образцов и снятия внутренних механических напряжений проводили их термический отжиг в муфельной печи при температуре 350 °С в течение 1 часа. После этого производили травление поверхности полученных образцов в растворе гидроксида натрия. Далее для осветления поверхности и удаления продуктов реакции образцы погружали в раствор азотной кислоты на 20 секунд и промывали в дистиллированной воде. После этого покрывали часть поверхности заготовок эпоксидной смолой для защиты границы раздела между воздухом и электролитом. Полученные образцы разделили на 3 группы. Образцы первой группы анодировали в 4%-ом растворе ортофосфорной кислоты в потенциостатическом режиме при напряжении 80 В и 100 В. Образцы второй группы анодировали в 4%-ом растворе щавелевой кислоты в потенциостатическом режиме при напряжении 60 В. Образцы третьей группы анодировали в 10%-ом растворе серной кислоты в потенциостатическом режиме при напряжении 10 В. Анодирование проводили в электрохимической ячейке с постоянным перемешиванием электролита для равномерного доступа электролита к поверхности образцов, что позволяет получить равномерную толщину оксидной плёнки по всей поверхности.

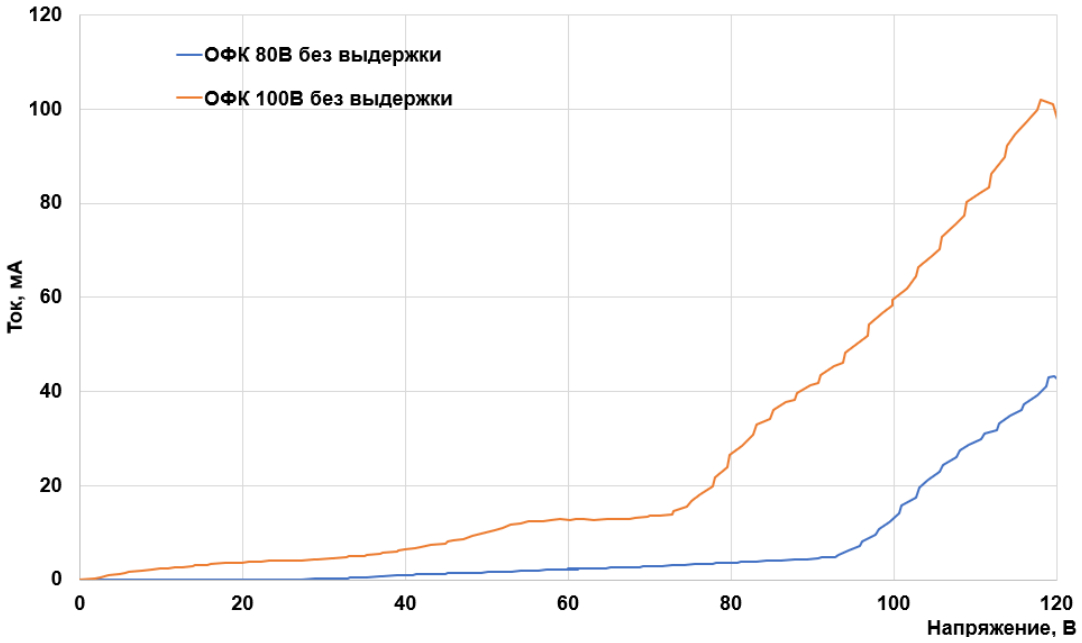


Рисунок 1. Кинетики реанодирования образцов, полученных в электролите на основе ортофосфорной кислоты при напряжении 80 В и 100 В

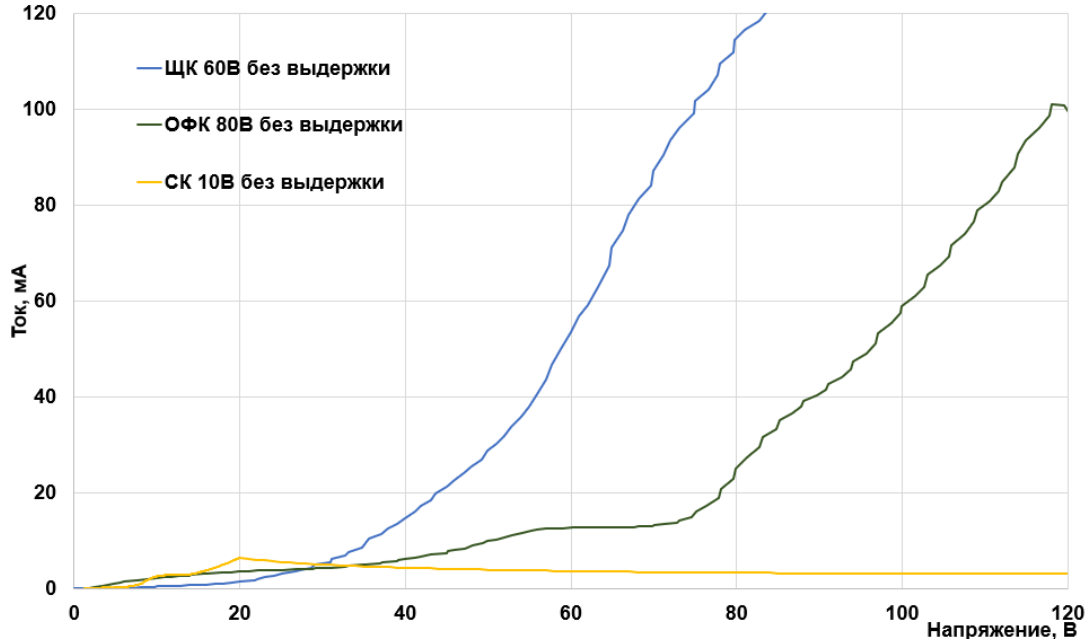


Рисунок 2. Кинетики реанодирования образцов, полученных в электролите на основе щавелевой кислоты, ортофосфорной кислоты и серной кислоты

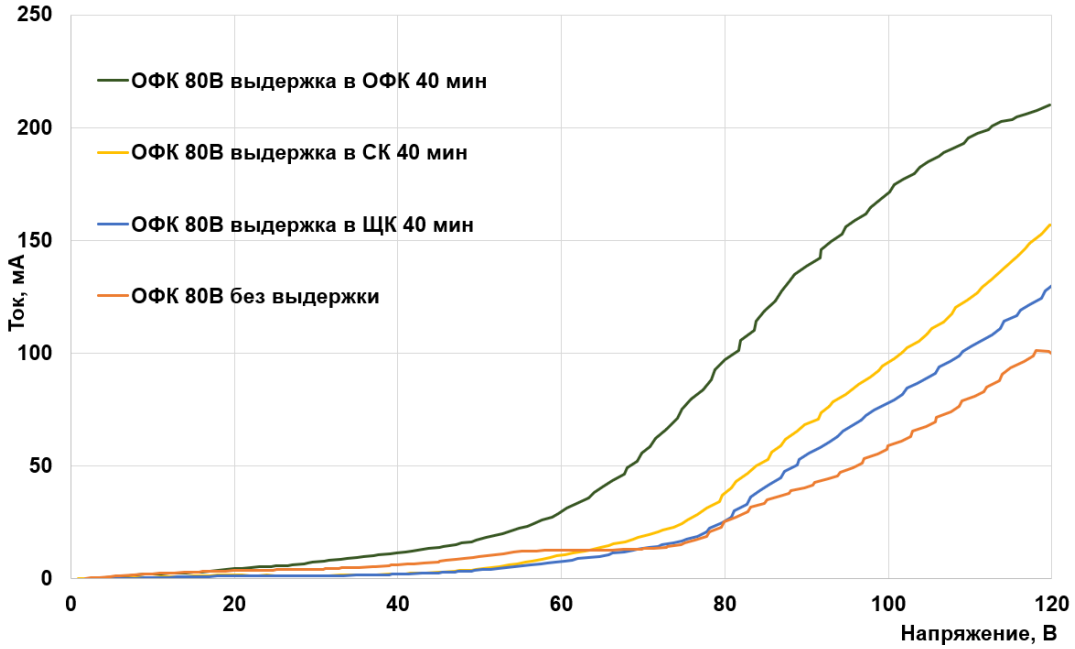


Рисунок 3. Кинетики реанодирования образцов, полученных в электролите на основе ортофосфорной кислоты с дополнительной выдержкой

После формирования и модификации пористых оксидных пленок алюминия проводили их повторное реаноидрование в растворе на основе лимонной кислоты в потенциодинамическом режиме со скоростью развертки напряжения 1 В/с до 120 В. По полученным хроновольтамперным характеристикам можно судить о структуре и морфологии пористого анодного оксида алюминия, полученного после первоначального анодирования и дополнительных модификаций. При увеличении напряжения первоначального анодирования происходит рост напряжения, при котором происходит электрохимический пробой во время реанодирования, что свидетельствует о прямой пропорциональной зависимости толщины барьерного слоя в пористой пленке от величины напряжения при первичном анодировании (рисунок 1). Толщина барьерного слоя прямо пропорциональна напряжению электрохимического пробоя с коэффициент от 1 до 1,15 нм/В. На рисунке 2 представлены кинетики реаноидрвоания образцов, полученных в различных электролитах. Наибольшая плотность

тока при реанодировании установлена в образцах, полученных в растворе на основе щавелевой кислоты, а наименьшее напряжение электрохимического пробоя в растворе на основе серной кислоты. Дополнительная выдержка в электролите приводит к травлению стенок пор, что приводит к уменьшению напряжения, при котором происходит электрохимический пробой при реанодировании (рисунок 3). Также увеличение значений тока анодирования после дополнительной выдержки свидетельствует об увеличении площади анодирования за счёт растрава стенок пор. По полученным зависимостям так же видно, что скорость травления в электролите на основе ортофосфорной кислоты выше, чем в электролитах на основе серной и щавелевой кислот. Также наблюдается отклонение характеристики образцов выдержанных дополнительно в электролите вверх относительно контрольных. Это связано с подтравом стенок пор и увеличения их диаметра.

Дополнительно проведено исследование влияния температуры электролита при дополнительной выдержке на структурно-морфологические параметры сформированных пленок. Электролит на основе ортофосфорной кислоты при дополнительной выдержке нагревали до 40 °С. При повторном анодировании снимали хроновольтамперные характеристики, по которым можно судить об изменении в морфологии оксидной плёнки. Ток анодирования у образцов, выдержанных при большей температуре, увеличился в среднем на 5-7%, что свидетельствует о большем растраве стенок пор и увеличения их площади.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена экспресс методика оценки структурно-морфологических параметров анодных оксидных пленок алюминия. Показано, что напряжение электрохимического пробоя коррелирует с напряжением анодирования и, следовательно, толщиной анодной оксидной пленки. Показано, что химическое травление путем выдержки анодной оксидной пленки в электролите анодирования уменьшает напряжение электрохимического пробоя и увеличивает ток анодирования после пробоя, что говорит о уменьшении толщины барьерного слоя и увеличении диаметра пор, что полностью согласуется с химическими процессами, происходящими в пленке. Установлено, что наибольшей скоростью травления обладают раствор на основе ортофосфорной кислоты. Увеличение температуры раствора до 40 °С приводит к увеличению скорости травления в среднем на 5-7%.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Сокол, В. А. Многослойность плотных анодных оксидов алюминия = Layered dense anodic alumina / В. А. Сокол // Доклады БГУИР. – 2011. – № 2 (56). – С. 5–12.

[2] Biran S.A, Korotkevich D.A., Garifov K.V., Dashkevich A.D. Influence of radiation exposure on the properties of dielectric layers based on anodic aluminum oxide. Doklady BGUIR. 2021; 19(8): 67-70.

[3] Zaraska, L. The effect of electrolyte change on the morphology and degree of nanopore order of porous alumina formed by two-step anodization / L. Zaraska, A. Brudzisz, E. Wierzbicka, G. D. Sulka // Electrochimica Acta. – 2016. – Vol. 198. – P. 259–267.

[4] Nishinaga, O. Rapid fabrication of self-ordered porous alumina with 10-nm-scale hole diameter by re-anodizing / O. Nishinaga, T. Kikuchi, S. Natsui, R. O. Suzuki // Scientific Reports. – 2013. – Vol. 3. – Art. 2748.

ANALYSIS OF ALUMINUM OXIDE MORPHOLOGY THROUGH RE-ANODIZATION IN A CITRIC ACID-BASED ELECTROLYTE

A.A. Gutkovskaya, D.A. Ovchinnikova, S.A. Biran, A.V. Korotkevich

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus, biran@bsuir.by

Abstract: anodic aluminum oxide (AAO) is widely utilized in the fabrication of various micro- and nanoelectronic devices. Typically, anodic oxide films are subjected to specific modifications depending on their intended application. This paper presents a rapid and cost-effective technique for evaluating the structure and morphology (pore diameter, barrier layer thickness, and porosity) of porous anodic aluminum oxide. The proposed method involves secondary anodization (re-anodization) in a weakly dissolving electrolyte (e.g., citric or boric acid), accompanied by the recording of chronoamperometric characteristics. Additionally, this study investigates the effect of immersing the formed oxide films in electrolytes of varying compositions. It is demonstrated that the electrochemical breakdown voltage during re-anodization is directly proportional to the barrier layer thickness.

Keywords: anodic aluminum oxide; porous nanostructures; electrochemical anodization; re-anodization; chronoamperometry.

УДК 621.396.6 + 536.24

ОБЗОР МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ И ТРЕБОВАНИЯ К ПОСТРОЕНИЮ СЕТКИ ДЛЯ ЗАДАЧ ОХЛАЖДЕНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Капельян С.В., Решетник П.В. Пискун Г.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, kapelyanreshetnik@gmail.com

Аннотация: выполнен обзор трёх RANS-моделей турбулентности для расчёта охлаждения ребристых радиаторов РЭА. Определены требования к расчётной сетке. Проведено сравнительное численное исследование в COMSOL Multiphysics при скоростях набегающего потока 2 и 6 м/с. Показано, что модель SST обеспечивает наилучшую точность при умеренных вычислительных затратах, тогда как k–ω требует в 1,5–4 раза больше времени счёта. Предложена методика выбора модели и параметров сетки для инженерных расчётов в диапазоне скоростей, характерных для систем воздушного охлаждения.

Ключевые слова: турбулентность, RANS-модели, ребристый радиатор, расчётная сетка, сеточная сходимость, охлаждение РЭА, скорость набегающего потока, сравнительный анализ.

I. ВВЕДЕНИЕ

Рост удельной тепловой мощности радиоэлектронной аппаратуры делает системы охлаждения критически важными. Жидкостное охлаждение предпочтительно для мощных компонентов, однако воздушные радиаторы широко применяются благодаря простоте и надёжности. Точный расчёт теплоотвода требует корректного моделирования турбулентности. Прямое численное моделирование (DNS) из-за сложности неприменимо в инженерной практике, поэтому используются подходы на основе осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса (RANS). Целью работы является систематический обзор трёх RANS-моделей разработка методики их сравнительной оценки для ребристых радиаторов РЭА в среде COMSOL Multiphysics.

II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ОБЗОР RANS-МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

В основе всех RANS-подходов лежит гипотеза Буссинеска о связи тензора напряжений Рейнольдса с полем осредненной скорости через турбулентную вязкость μ_t. Модели различаются по количеству решаемых уравнений переноса для определения μ_t.

а. Одноуравневая модель Спаларта–Аллмараса (SA)

Модель решает одно уравнение переноса для модифицированной турбулентной вязкости $\tilde{\nu}$ [1]. Ее преимущество – вычислительная экономичность и устойчивость на грубых сетках для пристеночных течений без отрыва. Однако она не даёт информации о кинетической энергии турбулентности k, что ограничивает её применение в сложных отрывных зонах.

б. Модель Вилкокса (k–ω)

Это двухуровневая модель, решающая уравнения для кинетической энергии турбулентности k и удельной скорости диссипации ω [2]. Модель точно разрешает вязкий подслой без пристеночных функций, что даёт хорошие профили скорости и температуры у стенок рёбер. Однако она чрезвычайно чувствительна к заданию ω на входной границе. В практике РЭА параметры обдува часто известны приближённо, поэтому использование k–ω сопряжено с риском нефизичных результатов.

в. Гибридная модель Ментера (k–ω SST)

Модель SST [3], является гибридной: она использует k–ω модель у стенки и k–ε модель в свободном потоке. Переключение реализуется через функцию смешивания F_1, зависящую от расстояния до стенки и градиентов скорости. Ключевым новшеством является ограничитель турбулентной вязкости:

$$\nu_t = \frac{0{,}31k}{\max(0{,}31\omega, \Omega F_2)} \left[{}^{м}/_{с}\right], \quad (1)$$

где Ω – модуль завихренности, $с^{-1}$; F_2 – вторая функция смешивания. Ограничитель предотвращает чрезмерное накопление ν_t в зонах с сильной деформацией среднего течения, что характерно для стандартной k–ω. Благодаря этому SST корректно моделирует как присоединённый пограничный слой на стенках, так и отрывной след за кромками рёбер, обеспечивая высокую точность прогноза

теплоотдачи [3]. Основные недостатки – повышенные требования к разрешению сетки и увеличенное время счёта примерно в 2 раза по сравнению с SA.

III. ТРЕБОВАНИЯ К ПОСТРОЕНИЮ РАСЧЕТНОЙ СЕТКИ ДЛЯ k–ω МОДЕЛЕЙ

Ключевым параметром является безразмерное расстояние до стенки

$$y^+ = \frac{\vartheta_\tau y}{\nu}, \quad (2)$$

где ϑ_τ – динамическая скорость, м/с, y – расстояние от стенки, м; ν – кинематическая вязкость, м^2/с.

Модели k–ω в своей стандартной форме являются низкорейнольдсовыми и для корректного разрешения вязкого подслоя требуют $y^+ < 1$ [3]. Это означает, что первый расчетный узел должен находиться внутри вязкого подслоя. Для проверки сеточной сходимости построены три варианта сетки с одинаковой топологией, различающиеся только глобальным коэффициентом измельчения. Количество элементов составляет: грубая – $70 \cdot 10^3$, средняя – $150 \cdot 10^3$, мелкая – $400 \cdot 10^3$. В пограничном слое необходимо не менее 15–20 ячеек, коэффициент роста ячеек менее 1,1–1,2. Для отрывных течений – локальное сгущение. Обязательна проверка сеточной сходимости: изменение термического сопротивления R□□ и перепада давления ΔP между соседними сетками менее 2 % [4].

IV. МЕТОДИКА ВЫСИЧЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА В COMSOL MULTIPHYSICS

а. Постановка задачи и численная модель

В качестве объекта исследования выбран типовой ребристый радиатор из алюминиевого сплава 6061, широко применяемый в системах воздушного охлаждения полупроводниковых приборов. Габаритные размеры основания составляют 100×80×5 мм; на верхней поверхности расположены 25 рёбер высотой 30 мм, толщиной 1 мм и шагом 4 мм. Тепловая нагрузка мощностью 50 Вт задана в виде равномерного теплового потока на нижней грани основания. Температура набегающего потока воздуха принята равной 25 °C. Скорость на входе: 2 м/с. Для оценки влияния скорости на точность моделей дополнительно проведён расчёт при скорости 6 м/с. Данное значение выбрано как верхняя граница типичных скоростей в системах принудительного воздушного охлаждения РЭА [5], при этом число Рейнольдса, рассчитанное по гидравлическому диаметру межрёберного канала, составляет $Re \approx 1{,}2 \cdot 10^3$, что соответствует развитому турбулентному режиму.

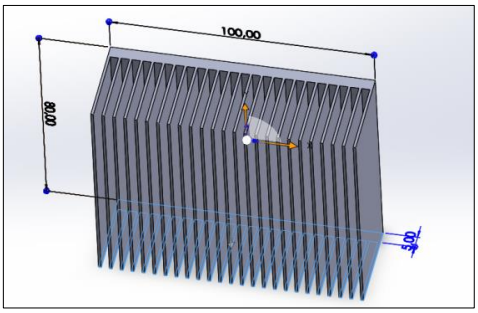
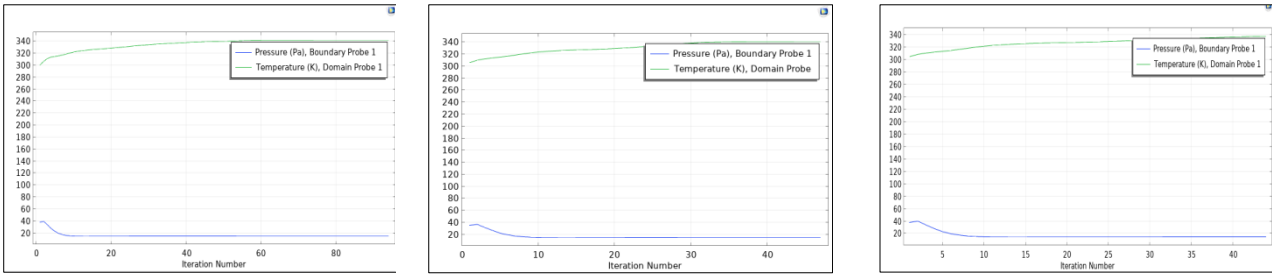


Рисунок 1. Трёхмерная геометрия радиатора с указанием основных размеров

Численное моделирование выполнено в программном комплексе COMSOL Multiphysics 6.3 с использованием модулей CFD и Heat Transfer. Сопряжённая задача решается через интерфейс Conjugate Heat Transfer, Turbulent Flow. Пространственная дискретизация выполнена методом конечных элементов на неструктурированных тетраэдральных сетках с призматическими слоями в пристеночных областях. Для аппроксимации конвективных членов использована схема второго порядка точности; связь давления и скорости реализована через метод P2–P1. Решение стационарных уравнений осуществлялось с помощью решателя Stationary Solver с использованием параллельного алгоритма PARDISO. Критерием остановки итерационного процесса служило выполнение относительной невязки менее 10^{-6}, а также стабилизация интегральных целевых функций с изменением не более 0,1 % за последние 50 итераций.

Для каждой модели использовалась автоматическая пристеночная обработка: при $y^+<1$ – низкорейнольдсовое разрешение, при грубой сетке – эмпирические функции. Это позволяет сравнивать модели при одинаковых сетках. Сеточная независимость решения проверялась на трёх последовательно сгущаемых сетках с одинаковой топологией и разным глобальным размером элементов. На мелкой сетке максимальное значение y^+ для всех моделей не превышало 0.8, что гарантирует корректное разрешение пограничного слоя для двухуравненных моделей.



(а) (б) (в)

Рисунок 2. Графики зависимости итераций от целевых функций для мелкой сетки для моделей SA (а), k-ω (б) и SST (в) при скорости 6 м/с

Сравнение результатов на мелкой сетке показывает, что модель SST обеспечивает наилучший баланс между точностью и скоростью сходимости. Её относительная погрешность по термическому сопротивлению минимальна и составляет 2,2 %. Ключевое преимущество SST заключается в существенном сокращении числа итераций, необходимых для достижения стационарного решения.

б. Анализ полученных результатов

Интегральные характеристики вычислялись из осреднённых по объёму и поверхности величин, полученных с помощью инструмента Derived Values: средней температуры твёрдого тела T_{avg} (°C), средние статические давления P_{in} и P_{out} (Па), тепловой поток на основании.

$$R_{th} = \frac{T_{avg} - 25}{50} \left[{}^{°C}/_{Вт}\right], \quad (5)$$

$$\Delta P = P_{in} - P_{out}\ [Па]. \quad (6)$$

По двум сеткам методом Ричардсона экстраполировали предельное значение R_{th}. Затем вычислили относительное отклонение каждой сетки от этого значения в процентах.

$$R_{exact} = R_{th.мелкая} + \frac{R_{th.мелкая} - R_{th.средняя}}{3} \left[{}^{°C}/_{Вт}\right], \quad (7)$$

$$\varepsilon = \frac{|R_{th} - R_{exact}|}{R_{exact}} \cdot 100\%. \quad (8)$$

Таблица 1. Результаты численного моделирования для скоростей 2 и 6 м/с

Модель	Сетка	R_{th}, °C/Вт		ΔP, Па		Время, ч		y^+_{max}		Ошибка ε, %	
		2 м/с	6 м/с	2 м/с	6 м/с	2 м/с	6 м/с	2 м/с	6 м/с	2 м/с	6 м/с
SA	Грубая	1,59	1,05	1,65	12,2	0,18	0,28	42,5	45,2	24,7	22,1
	Средняя	1,42	0,95	2,13	14,6	0,52	0,61	19,8	22,8	12,1	10,9
	Мелкая	1,31	0,88	2,85	16,9	1,76	1,22	10,9	11,5	5,1	2,8
k–ω	Грубая	1,52	1,02	1,85	12,7	0,21	0,35	48,3	48,6	25,5	21,8
	Средняя	1,39	0,92	2,36	14,9	0,41	1,82	21,5	24,5	14,2	10,5
	Мелкая	1,26	0,86	3,13	16,9	5,67	5,07	10,6	12,2	5,5	2,6
SST	Грубая	1,46	0,99	1,95	11,8	0,46	0,42	35,9	39,5	30,4	19,2
	Средняя	1,28	0,91	2,61	14,3	1,54	1,75	15,2	19,8	14,8	8,9
	Мелкая	1,16	0,86	3,42	16,6	3,58	4,91	7,9	9,8	3,7	2,2

Анализ данных из таблицы 1 позволяет сделать следующие выводы:

1. Для всех моделей наблюдается монотонное уменьшение R_{th} при сгущении сетки. При увеличении скорости с 2 до 6 м/с величина R_{th} снижается на 25-30 %. Переход от грубой к средней сетке даёт наибольшее изменение, тогда как от средней к мелкой – менее 10 %, что свидетельствует о достижении

сеточной сходимости. Модель SST показывает наименьшую чувствительность к сетке, что подтверждает её устойчивость.

2. На мелкой сетке модель SST обеспечивает минимальную относительную погрешность при обеих скоростях. Однако все три модели дают приемлемую точность на мелкой сетке, но SST отличается наименьшей чувствительностью к скорости и размеру сетки. Вычислительные затраты модели k–ω существенно выше и в 1,5–4 раза превышает время для SST. Следовательно, модель k–ω является наименее эффективной с инженерной точки зрения.

3. Даже на мелкой сетке значения y^+_{max} составляют 8–12, что превышает рекомендованные значения для низкорейнольдсовых моделей. Это объясняется использованием автоматических пристеночных функций в COMSOL при недостаточном разрешении пограничного слоя. Однако, поскольку все модели рассчитывались на сетках с одинаковой топологией и последовательным измельчением, сравнение моделей между собой корректно.

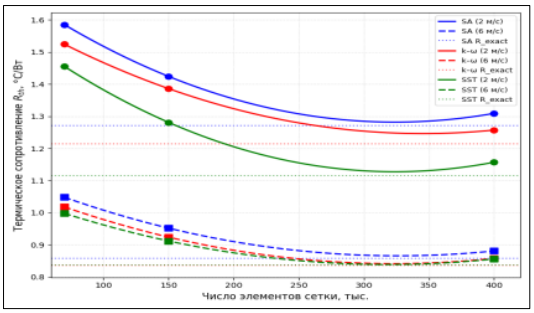


Рисунок 3. Сеточная сходимость Rth для трёх моделей турбулентности

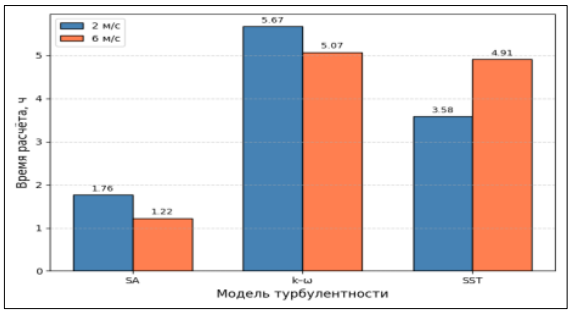


Рисунок 4. Гистограмма времени расчёта для трёх моделей на мелкой сетке

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование трёх RANS-моделей для охлаждения ребристого радиатора в диапазоне скоростей 2 и 6 м/с показало, что модель SST обеспечивает наилучший баланс точности и вычислительных затрат. Модель SA уступает по точности, но экономична; модель k–ω даёт точность, сопоставимую с SST, однако требует значительно большего времени счёта, что делает её нецелесообразной. Для корректных результатов необходим контроль $y^+<1$ и проверка сеточной сходимости; на грубых сетках автоматические пристеночные функции могут занижать точность. Рекомендуется использовать SST как базовую модель для инженерных расчётов, а SA – для быстрых предварительных оценок. Предложенная методика может служить стандартом при выборе сеточных параметров и моделей турбулентности в задачах терморегулирования РЭА.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Spalart, P. R., Allmaras, S. R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows // AIAA Paper 92-0439. 1992.

[2] Wilcox, D. C. Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models // AIAA Journal. 1988. Vol. 26, No 11. P. 1299–1310.

[3] Menter, F. R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications // AIAA Journal. 1994. Vol. 32, No 8. P. 1598–1605.

[4] Bardina, J. E., Huang, P. G., Coakley, T. J. Turbulence Modeling Validation, Testing, and Development // NASA TM-110446. 1997.

[5] Пискун Г.А., Алексеев В.Ф., Беликов А.Н., Рыбаков Д.Г. Моделирование отведения тепловой энергии от процессоров при помощи кулеров воздушного охлаждения // Доклады БГУИР. – 2023. – Т. 21, № 4. – С. 54–62.

REVIEW OF TURBULENCE MODELS AND MESH GENERATION REQUIREMENTS FOR ELECTRONIC COOLING APPLICATIONS

S. V. Kapelyan, P. V. Reshetnik, G.A. Piskun

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
kapelyanreshetnik@gmail.com

Abstract: a review of three RANS turbulence models for simulating the cooling of finned heat sinks in electronic equipment. The requirements for the computational mesh are defined. A comparative numerical study was conducted using COMSOL Multiphysics at inlet flow velocities of 2 and 6 m/s. It is shown that the SST model provides the best accuracy at a moderate computational cost, whereas the k–ω model requires 1.5 to 4 times more computation time. A methodology for selecting the turbulence model and mesh parameters for engineering calculations within the velocity range typical for air-cooling systems is proposed.

Keywords: turbulence, RANS models, finned heat sink, computational mesh, mesh convergence, electronic equipment cooling, inlet flow velocity, comparative analysis.

УДК 621.396.6:536.24

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НАГНЕТАТЕЛЕЙ ВОЗДУХА В SOLIDWORKS FLOW SIMULATION

Яромченко А.Г., Пискун Г.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, jaromchenkoandrei@gmail.com

Аннотация: в статье рассматривается методология моделирования тепловых режимов радиоэлектронных средств (РЭС) в среде SolidWorks Flow Simulation на примере упрощенной модели блока питания. Описан порядок настройки граничных условий, физических свойств материалов, источников тепловыделения и параметров осевого вентилятора через его зависимость разности давлений от потока воздуха вентилятора. Проведен сравнительный анализ эффективности охлаждения при естественной конвекции, а также при вертикальной и горизонтальной ориентации вентилятора. Установлено, что горизонтальное расположение нагнетателя обеспечивает наиболее эффективный отвод тепла.

Ключевые слова: радиоэлектронная аппаратура, моделирование, вентилятор, SolidWorks Flow Simulation.

I. ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие радиоэлектронной аппаратуры ведёт к постоянному повышению производительности вместе с уменьшением ее габаритов приводит к существенному возрастанию тепловой нагрузки на внутренние компоненты. Обеспечение оптимального теплового режима становится одной из наиболее важных задач на этапе конструирования, поскольку перегрев электронных компонентов снижает их надежность, отказоустойчивость и срок службы.

Применение принудительного воздушного охлаждения – наиболее распространенный способ решения проблемы перегрева. При этом итоговая эффективность терморегулирования определяется не только паспортными характеристиками кулера, но и геометрией его установки, аэродинамическим сопротивлением каналов и особенностями циркуляции воздушных масс внутри корпуса [1-4].

Основная цель работы – проведение численного эксперимента в среде SolidWorks Flow Simulation для оценки влияния наличия вентилятора и его пространственной ориентации (вертикальной или горизонтальной) на тепловое состояние критически важных элементов РЭС.

II. МЕТОДОЛОГИЯ И ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

В качестве примера устройства, в котором будут использоваться вентиляторы, будет упрощенная модель источник питания с размера корпуса 121×78×39 мм (рисунок 1).

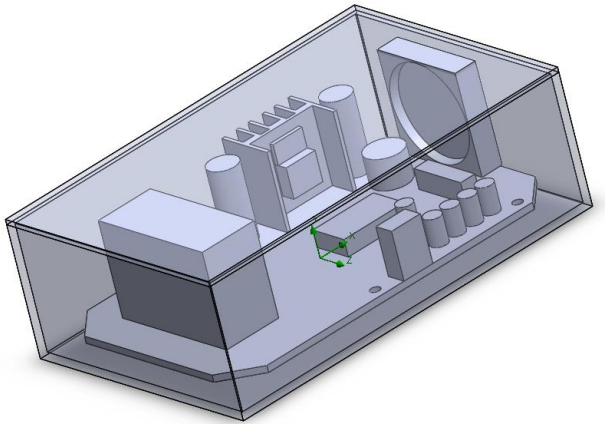


Рисунок 1. Модель источника питания

Моделирование будет проводиться в дополнении *SolidWorks Flow Simulation*. Первоочередно необходимо задать основные настройки проекта: тип задачи, текучая среда, материал по умолчанию, условия на снеках и начальные условия в разделе «Общие настройки» на рабочей панели. Начальные условия соответствуют климатическому исполнению УХЛ 4.2. На рисунке 2 приведены начальные условия и тип задачи.

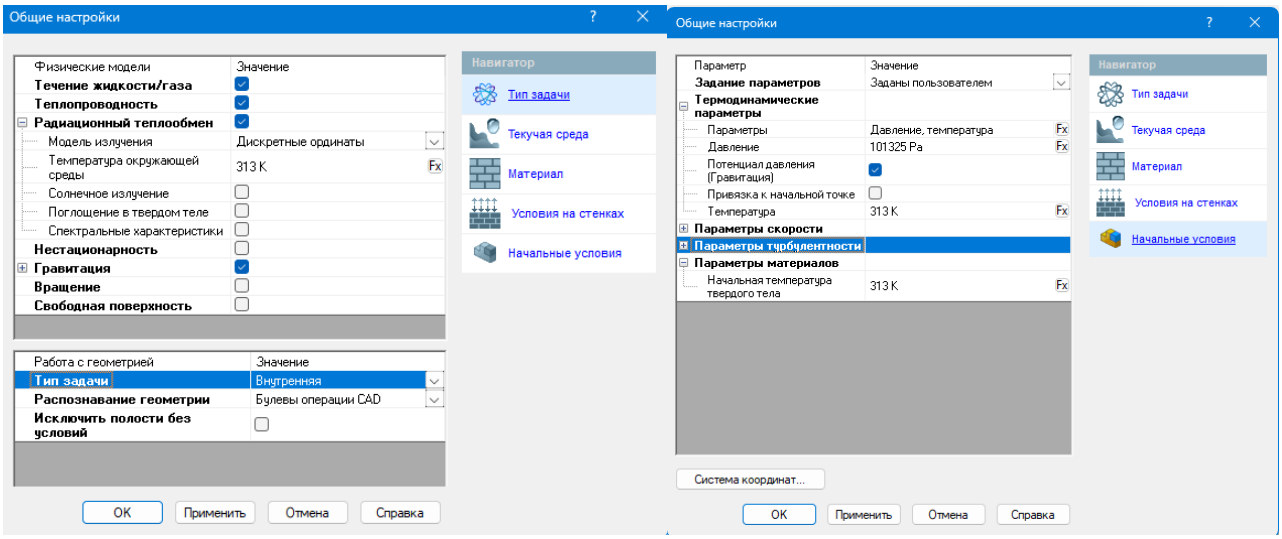


Рисунок 2. Тип задачи и начальные условия

С помощью инструмента «Материалы» в дереве исследования необходимо задать материал на все элементы, например: *Aluminum 6061* для радиаторов охлаждения силовых элементов и для корпуса, *Alumina Typical* в качестве приближения для полупроводниковых структур, металлических соединений, изоляционных материалов и пассивных компонентов, *Polybutylene Terephthalate (PBT)* для вентилятора, для печатной платы *FR4*. На рабочей панели выберем «Источники». В появившемся контекстном меню выберем «Объемный тепловой источник» и зададим источники тепла. В представленной модели наибольшее количество тепла рассеивают 7 элементов (суммарно 4,25 Вт): транзистор (1,25 Вт), трансформатор (2,5 Вт), микросхема (0,1 Вт), дисплей (0.1 Вт), светодиод красный (0,2 Вт), светодиод зеленый (моргающий, 0,1 Вт), подстроечный резистор (0,1 Вт). Создадим поверхности теплообмена посредством излучения, с помощью инструмента «Поверхности радиационного теплообмена» в дереве исследований. Для элементов нагретой зоны создаем материал с степенью черноты 0,8 и таким же коэффициентом поглощения солнечного излучения. Для корпуса это значение будет равно 0,92. Для обеспечения газообмена расчетной области необходимо задать подобласть течения. Для создания вентилятора необходимо переходим в *CommandManager* по пути «Условия – Вентилятор». В открывшемся окне «*Property manager*» в поле «Тип» необходимо выбрать тип вентилятора «Внутренний вентилятор», также необходимо задать выходную и входную поверхность вентилятора, из этих поверхности в дальнейшем будет выходить и входить воздух соответственно. Для создания пользовательского вентилятора выберем «Созд./Изм…». В открывшемся окне «Инженерная база данных» нажмём «Новый элемент» и зададим свойства вентилятора.При задании свойств вентилятора указываются такие параметры, как режим работы (внешний на вдув или выдув, внутренний), температура подаваемого воздуха, тип вентилятора (осевой/радиальный) и многое другое. Основные задаваемые параметры приведены на рисунке 3.

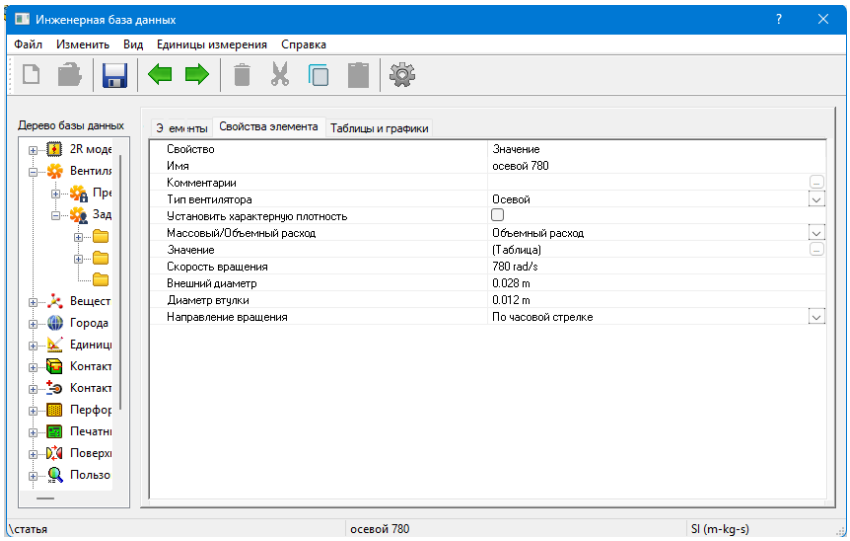


Рисунок 3. Параметры вентилятора

Одной из важнейших характеристик является зависимость разности давлений от потока воздуха вентилятора, обычно задаваемая графиком [5, 6]. На рисунке 4 показан график такой зависимости, заданный в модели.

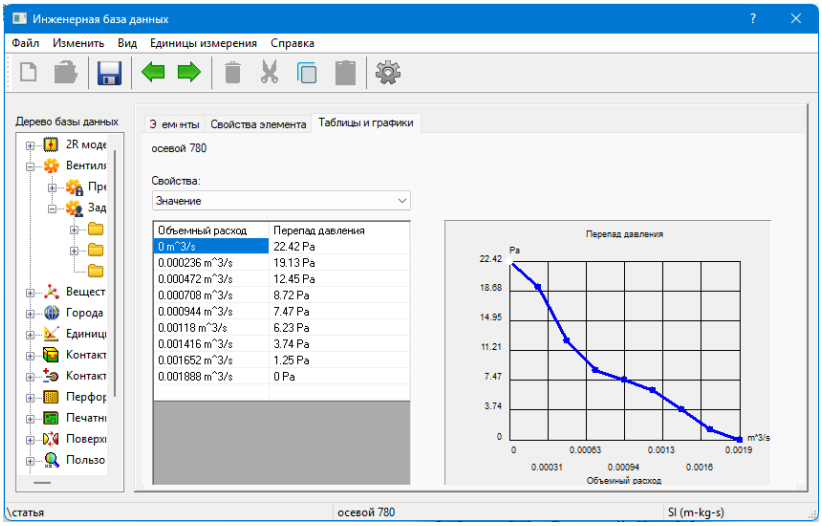


Рисунок 4. График зависимости

Перед началом расчета создадим необходимы цели, для отслеживания результатов. В данном случаи целями будут средние значения: температура воздуха в блоке, скорость воздуха в блоке, максимальная температура элемента, температура корпуса, температура нагретой зоны.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В ходе моделирования выполнен расчет трех конфигураций системы охлаждения источника питания. В таблицу 1 приведены результаты решения 3 конфигураций: без использования принудительного охлаждения, с использование вертикально ориентированного вентилятора, с использование горизонтально ориентированного вентилятора.

Таблица 1. Результаты моделирования тепловых режимов блока питания

Параметры	Без вентилятора	Вертикальная ориентация	Горизонтальная ориентация
Температура воздуха в блоке, К	330,898	329,144	328,557
Температура корпуса, К	323,417	323,313	323,557
Температура нагретой зоны, К	341,422	338,384	336,963
Температура элемента, К	345,852	340,548	338,562
Скорость воздуха в блоке, м/с	–	0,435	0,329

Анализ результатов показывает, что отсутствие принудительного обдува приводит к максимальному перегреву активных элементов до 345,852 К. Установка вертикального вентилятора обеспечивает продольный продув корпуса со средней скоростью потока 0,435 м/с, что снижает температуру критического элемента до 340,548 К (на 5,3 К). Наиболее эффективной оказалась горизонтальная ориентация нагнетателя: несмотря на меньшую среднюю скорость воздуха в объеме корпуса, достигается минимальная температура воздуха 328,557 К и критических компонентов 338,562 К, (снижение на 7,3 К по сравнению с естественной конвекцией). Это объясняется созданием локального струйного воздействия непосредственно на радиаторы силового транзистора и трансформатора, находящихся под вентилятором. На рисунке 5 приведено два результата моделирования температурных полей элементов и траекторий движения воздушного потока при вертикальной и горизонтальной ориентации вентилятора.

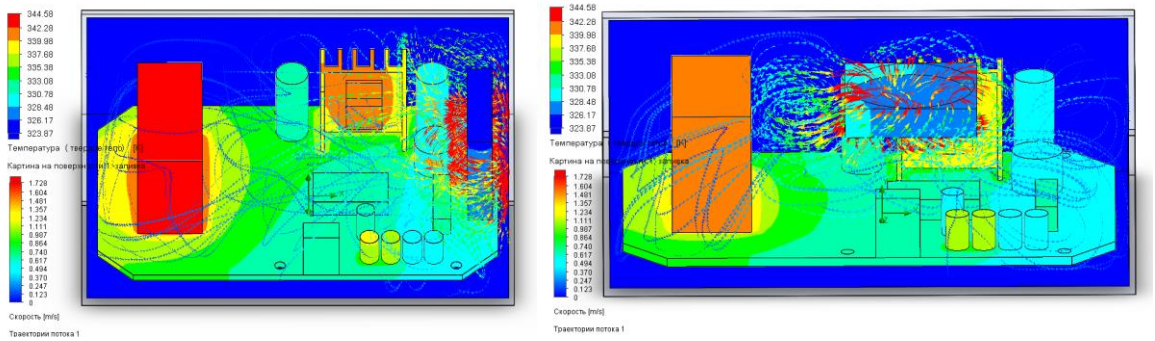


Рисунок 5. Распределение температурных полей элементов и траекторий движения воздушного потока при вертикальной и горизонтальной ориентации вентилятора

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного моделирования в среде SolidWorks Flow Simulation подтверждена определяющая роль правильного задания зависимость разности давлений от потока воздуха вентилятора характеристик и пространственной ориентации вентилятора. Для исследуемого блока питания горизонтальное расположение нагнетателя обеспечивает наилучший теплоотвод от наиболее нагруженных компонентов, снижая температуру тепловыделяющих элементов на 1,98 К по сравнению с вертикальным монтажом и на 7,29 К по сравнению с естественным охлаждением.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Пискун, Г. А. Моделирование отведения тепловой энергии от процессоров при помощи кулеров воздушного охлаждения / Г. А. Пискун, В. Ф. Алексеев, А. Н. Беликов, Д. Г. Рыбаков // Доклады БГУИР. — 2023. — Т. 21, № 4. — С. 54–62

[2] Пискун Г. А. Оптимизация теплового режима приемо-передающего устройства по результатам моделирования тепловых процессов в среде SolidWorks Flow Simulation/. Пискун Г. А, Алексеев В. Ф., Романовский П. С., Стануль А. А — 2019. — Vol. 1, № 35. — С. 47–60.

[3] Алямовский, А. А. SolidWorks/Flow Simulation. Инженерный анализ гидрогазодинамических процессов / А. А. Алямовский. — М. : ДМК Пресс, 2014. — 256 с.

[4] Пискун, Г. А. Влияние ориентации каналов в кулерах воздушного охлаждения на эффективность отведения тепла от процессоров / Г. А. Пискун, В. Ф. Алексеев, А. Н. Беликов, Д. Г. Рыбаков // Доклады БГУИР. — 2023. — Т. 21, № 5. — С. 33–41.

[5] Моделирование тепловых режимов работы аппаратуры силовой электроники в среде SolidWorks Flow Simulation // Силовая электроника [Электронный ресурс]. — URL: https://power-e.ru/sapr/modelirovanie-teplovyh-rezhimov-raboty-apparatury-silovoj-elektroniki-v-srede-solidworks-flow-simulation/ (дата обращения: 14.07.2026).

[6] Thermal Analysis with SOLIDWORKS Flow Simulation // Engineers Rule [Electronic resource]. — URL: https://www.engineersrule.com/thermal-analysis-with-solidworks-flow-simulation/ (mode of access: 14.07.2026).

PARAMETERIZATION AND MODELING OF AIR BLOWER CHARACTERISTICS IN SOLIDWORKS FLOW SIMULATION

A.G. Yaromchenko, G.A. Piskun

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
jaromchenkoandrei@gmail.com

Abstract: this article examines the methodology for modeling the thermal conditions of electronic equipment (EE) in SolidWorks Flow Simulation using a simplified power supply model as an example. The procedure for setting up boundary conditions, physical properties of materials, heat sources, and axial fan parameters using its aerodynamic P-Q characteristic is described. A comparative analysis of cooling efficiency is conducted for natural convection, as well as for vertical and horizontal fan orientations. It is established that a horizontal fan orientation provides the most efficient heat dissipation.

Keywords: electronic equipment, modeling, fan, SolidWorks Flow Simulation.

УДК 628.9.038

ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО В-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАВИННЫХ СВЕТОДИОДОВ НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО КРЕМНИЯ

Клюцкий А.Ю., Лазарук С.К., Долбик А.В., Стома С.С., Дудич В.В., Лабунов В.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, lazaruk@bsuir.by

Аннотация: проведено исследование влияния ионизирующего β-излучения на характеристики лавинных светодиодов на основе наноструктурированного кремния. Дозы облучения составляли от 100 до 1000 Гр. В качестве источника ионизирующего β - излучения использовался итрий-стронцевый сплав с активностью излучения 300 кБк с временной продолжительностью от 1 дня до 30 дней. По мере увеличения дозы облучения наблюдалось увеличение порогового напряжения светоизлучения от 5 до 9 В, что объясняется увеличением плотности индуцированного отрицательного электрического заряда в изоляционных слоях. Изменение интенсивности светоизлучения в зависимости от тока светодиода не наблюдалось, что свидетельствует о стойкости функционирования светодиодов под действием β - излучения при дозах до 1000 Гр.

Ключевые слова: β – излучения, лавинные светодиоды, вольт-амперные характеристики.

I. ВВЕДЕНИЕ

Светодиоды на основе наноструктурированного кремния представляют собой перспективные элементы для применения в оптических системах связи. Эти устройства функционируют на принципе лавинного пробоя [1-4], что обеспечивает их высокую скорость работы и широкую полосу пропускания. Использование светодиодов подобного типа позволяет разрабатывать высокоскоростные системы оптических межсоединений [5,6] для замены существующих проводных интерфейсов, что существенно снизит задержки, обусловленные RC-эффектами. А возможность интеграции в существующие технологические процессы упрощает их массовое производство [7-9].

Понимание влияния ионизирующего излучения особенно важно для оценки надежности и устойчивости лавинных светодиодов в различных сферах применения, включая использование в космической и медицинской аппаратуре. В данной работе анализируется влияние ионизирующего излучения на эксплуатационные характеристики лавинных светодиодов из наноструктурированного кремния, что способствует дальнейшему развитию кремниевой фотоники в контексте повышения надежности и эффективности функционирования подобных устройств.

II. ЭКСПЕРИМЕНТ

Формирование матриц лавинных светодиодов на основе наноструктурированного кремния представлено в наших работах [10,11]. Светоизлучающим материалом является наноструктурированный кремний, встроенный в анодный оксид алюминия, что обеспечивает стабильность его функционирования в качестве источника света. Размеры светоизлучающих элементов определяются размерами алюминиевых электродов, обеспечивающих подачу смещающего напряжения и протекания электрического тока. Измерения ВАХ проводились в режиме развертки смещающего напряжения при температуре 20 °С. В качестве источника ионизирующего β - излучения использовался итрий-стронцевый сплав с активностью излучения 300 кБк с временной продолжительностью от 1 дня до 30 дней… Исследуемые образцы размещались в свинцовом корпусе на расстоянии 2 мм от источника излучения, что обеспечивало поглощенную образцами суточную дозу от 30-40 Гр. Месячная доза поглощения составила 900-1000 Гр.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 1 представлена фотография матрицы исследуемых лавинных светодиодов. В центре расположен светодиод, на который подано напряжение 10 В, обеспечивающее протекание тока 10 мА. Встречно-штыревая форма электродов излучает свет, как видно на рисунке 1. Интенсивность излучения достаточна для его визуализации при обычном комнатном освещении. В затемненном помещении визуализация светоизлучения имеет место при токе около 1 мА. Как было показано в наших работах, стабильность светоизлучения сохраняется при испытаниях более 1000 часов непрерывного функционирования, что достигается за счет эффективной защиты светоизлучающего материала наноструктурированного кремния пленкой анодного оксида алюминия [1].

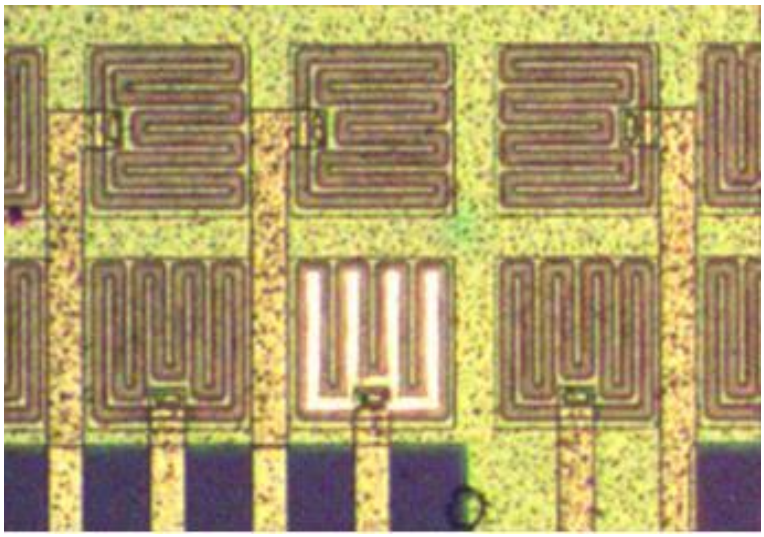


Рисунок 1. Светящийся контур в ячейке лавинных светодиодов

На рисунке 2 представлены графики ВАХ светодиодов до и после облучения. Как видно из рисунка при увеличении дозы облучения вольт-амперные характеристики светодиодов смещаются в область более высоких напряжений. Принимая во внимание, что пороговое значение светоизлучения заметного невооруженным глазом в затемненном пространстве составляет 1 мА значение порогового напряжения при облучении увеличивается от 5 до 9 В. При этом зависимость интенсивности светоизлучения от тока через светодиод не изменяется [12]. Данный эффект может быть объяснен индуцированием дополнительного отрицательного электрического заряда в анодном оксиде алюминия под действием ионизирующего β - излучения. В подтверждении этого свидетельствует эффект возвращения исследумых ВАХ к исходному состоянию (до облучения) после отжига при температурах 400-450 °С в течение 30-60 минут. Именно увеличение плотности отрицательного электрического заряда вызывает увеличение порогового напряжения лавинного пробоя.

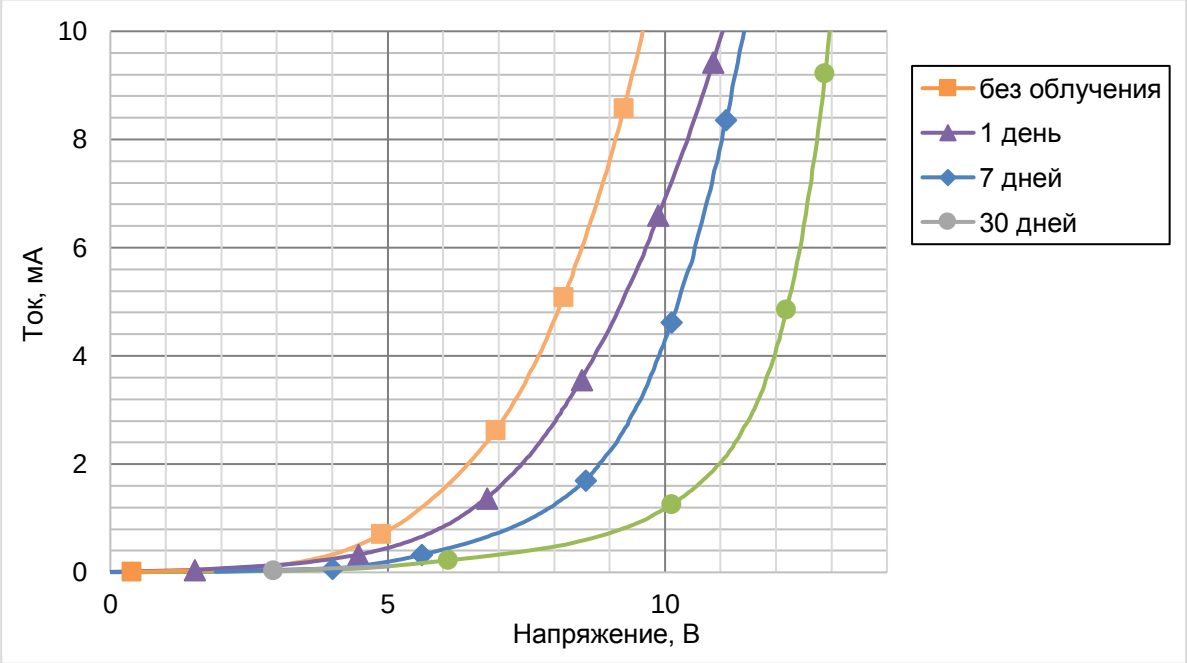


Рисунок 2. Вольт-амперная характеристика лавинных светодиодов при обратном смещении до и после облучения

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом проведенные исследования показали, что ионизирующее β - излучение дозами до 1000 Гр не вызывает деградации функционирования лавинных светодиодов на основе наноструктурированного кремния. При этом увеличение порогового напряжения светоизлучения при

увеличении дозы облучения объясняется увеличением плотности индуцированного отрицательного электрического заряда в анодном оксиде алюминия.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ проект № Т26УЗБ-040 (формирование светоизлучающих диодов) и БРФФИ проект № Т26В-010 (измерение характеристик светодиодов).

ЛИТЕРАТУРА

[1] Lazarouk, S. Stable electroluminescence from reverse biased n-type porous silicon-aluminum Schottky junction device / S. Lazarouk, et al. // Applied Physics Letters. – 1996. – Vol. 68 (15). – P. 2108-2110.

[2] Berashevich, J.A. Electroluminescence in porous silicon at a reverse bias voltage applied to the Schottky barrier / J.A. Berashevich, S.K. Lazarouk, V.E. Borisenko // Semiconductors. – 2006. – Vol. 40 (2). – P. 234-239.

[3] Lazarouk, S. Electrical characterization of visible emitting electroluminescent Schottky diodes based on n-type porous silicon and on highly doped n-type porous polysilicon / S. Lazarouk, V. Bondarenko, P. Jaguiro et al. // Journal of Non-Crystalline Solids. – 1996. – Vol. 198. – P. 973-976.

[4] La Monica, S. Characterization of porous silicon light emitting diodes in high current density conditions / S. La Monica, et al. // Solid State Phenomena. – 1997. – Vol. 54. – P. 21-26.

[5] Jaguiro, P. Si-based optoelectronic couple / P. Jaguiro et al. // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. – 2009. – Vol. 41 (6). – P. 1094-1096.

[6] Lazarouk, S.K. Reverse biased porous silicon light-emitting diodes for optical intra-chip interconnects / S.K. Lazarouk, et al. // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. – 2003. – Vol. 16. – P. 495-498.

[7] Jaguiro, P. Si-based emissive microdisplays / P. Jaguiro, P. Katsuba, S. Lazarouk, M. Farmer, A. Smirnov // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. – 2009. – Vol. 41 (6). – P. 927-930.

[8] Buzaneva, E. Photophysical properties of nano Si/SiOx composites in Al/composite/mono Si structures for green light emitting and photodetector-Schottky diodes / E. Buzaneva, et al. // Materials Science in Semiconductor Processing. – 2000. – Vol. 3 (5-6). – P. 529-537.

[9] Lazarouk, S. Electroluminescence from nanostructured silicon embedded in anodic alumina / S. Lazarouk, et al. // Semiconductors. – 2007. – Vol. 41 (9). – P. 1109-1112.

[10] Chelyadinsky, A. Deformation of porous silicon lattice caused by absorption/desorption processes / A. Chelyadinsky, et al. // Journal of the Electrochemical Society. – 1997. – Vol. 144 (4). – P. 1463-1468.

[11] Лазарук, С.К. Влияние локальной напряженности электрического поля на формирование упорядоченной структуры пористого анодного оксида алюминия / С.К. Лазарук, и др. // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 65 (9). – С. 86-90.

[12] Lazarouk, S. Optical characterization of reverse biased porous silicon light emitting diode / S. Lazarouk, et al. // Materials Science and Engineering. – 2000. – Vol. 69-70. – P. 114-117.

EFFECT OF IONIZING β-RADIATION ON THE CHARACTERISTICS OF AVALANCHE LIGHT-EMITTING DIODES BASED ON NANOSTRUCTURED SILICON

A.Y. Klutsky, S.K. Lazarouk, A.V. Dolbik, S.S. Stoma, V.V. Dudich, V.A. Labunov

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
lazaruk@bsuir.by

Abstract: a study was conducted on the effect of ionizing beta radiation on the characteristics of avalanche light-emitting diodes (LEDs) based on nanostructured silicon. Irradiation doses ranged from 100 to 1000 Gy. An yttrium-strontium alloy with an activity of 300 kBq served as the ionizing beta radiation source, with exposure times ranging from 1 to 30 days. As the irradiation dose increased, the threshold voltage rose from 5 to 9 V. This is attributed to an increase in the density of induced negative electric charge within the insulating layers. No changes in light emission intensity relative to the LED current were observed, demonstrating the operational stability of the LEDs under beta radiation at doses up to 1000 Gy.

Keywords: β –radiation, avalanche light emitting diodes, current-voltage characteristics.

UDC 621.382.323

SIMULATION OF THE FOWLER–NORDHEIM TUNNELING CURRENT THROUGH THE GATE DIELECTRIC OF ALGAN/ALN/GAN MIS-HEMT

V. Volcheck[1], F. Novikau[1], V. Pashkevich[1], D. Hvazdouski[1], K. Hulikava[2]

[1]Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
vlad.volchek@bsuir.by

[2]JSC “INTEGRAL” – the Management Company of the Holding "INTEGRAL", Minsk, Republic of Belarus

Abstract: in metal–insulator–semiconductor high electron mobility transistors (MIS-HEMTs) based on GaN, two main conduction mechanisms contribute to the gate leakage current. At low electric fields across the gate dielectric, the dominant mechanism is Poole–Frenkel emission. At sufficiently high electric fields, the gate leakage current is primarily governed by Fowler–Nordheim tunneling. The latter process is strongly dependent on the applied electric field and the dielectric properties, which makes it a critical factor in the design of the gate stack. In this paper, we estimated the Fowler–Nordheim tunneling current through the thin SiO_2 gate dielectric of an AlGaN/AlN/GaN MIS-HEMT at low to medium reverse and forward gate-source biases. It is shown that the leakage current through ultrathin 2–4-nm SiO_2 layers may cause electrical breakdown of the gate dielectric, when the device is biased at less than ±20 V.

Keywords: Fowler–Nordheim model, gallium nitride, gate dielectric, high electron mobility transistor, silicon dioxide, simulation, leakage current, tunneling current.

I. INTRODUCTION

In field-effect transistors that have a metal–insulator–semiconductor gate structure, the conductance of the dielectric layer would ideally be considered zero. However, for devices with very thin gate dielectrics, significant conductance is measured at the gate contacts. The gate leakage current is responsible for the degradation in device performance over time. This reliability issue is important because the lifetime of electronic parts has to be guaranteed. There are a variety of conduction mechanisms across an insulating layer, but only two main conduction processes are relevant in MIS-HEMTs. At low electric fields across the gate dielectric, the dominant mechanism is Poole–Frenkel emission. At sufficiently high electric fields, the gate leakage current is primarily governed by Fowler–Nordheim tunneling. We estimated the Fowler–Nordheim tunneling current through the thin SiO_2 gate dielectric of an AlGaN/AlN/GaN MIS-HEMT at low to medium reverse and forward gate-source biases.

II. SIMULATION DETAILS

The device structure is shown in Fig 1. Its active area consists of a 5.2-μm GaN buffer layer, a 2-nm AlN spacer and a 15-nm $Al_{0.2}Ga_{0.8}N$ barrier layer. The source-gate and gate-drain distances are equal to 4.5 and 16 μm, respectively. The gate length is 2 μm.

When the electric field across the dielectric is very high, electrons may tunnel from the metal Fermi level into the dielectric conduction band. The Fowler–Nordheim equation [1] describes the tunneling current through the dielectric and has the following form:

$$J_{FN} = AE^2 \exp\left(-\frac{B}{E}\right), \tag{1}$$

where E is the electric field intensity (V/m) and

$$A = \frac{q^2}{8\pi h m_{eff} \varphi_b}, \tag{2}$$

$$B = \frac{8\pi \left(2 m_e m_{eff}\right)^{0.5} \left(q\varphi_b\right)^{1.5}}{3qh}, \tag{3}$$

where q is the elementary charge (C), h is the Planck constant ($m^2 \cdot kg \cdot s^{-1}$), m_{eff} is the effective electron mass (in non-dimensional units), φ_b – barrier height (eV), m_e is the electron mass (kg).

For Fowler–Nordheim tunneling simulations, the effective electron mass in SiO_2 is usually an adjustable parameter, with values ranging from 0.3 to 0.5. In this work, we used a value of 0.4 [2]. For the work function of the gate metal, a value of 5 eV was assigned, which corresponds to nickel [3], since Ni/Au is a standard

choice for Schottky gates of MIS-HEMTs based on GaN. For the electron affinity of SiO_2, we set a value of 0.9 eV [4]. As a result, the barrier height between the metal and the gate dielectric equals 4.1 eV. Finally, the *A* and *B* coefficients are $9.40 \cdot 10^{-7}$ A/V^2 and $3.59 \cdot 10^{10}$ V/m, respectively.

III. SIMULATION RESULTS

The Fowler–Nordheim model can be implemented using either the self-consistent or the post-processing scheme. In the first case, the tunneling current is directly added to the current continuity equations. In the post-processing version, the tunneling current is calculated from the solution to the device equations at each bias step. In Fig. 2, the drain current vs gate-source voltage characteristics of the MIS-HEMT under consideration are presented. The thickness of the SiO_2 gate dielectric is varied from 4 to 10 nm. The characteristics were obtained by the post-processing method thus precluding the gate current from being added to any terminal current. The drain-source voltage is 0.1 V.

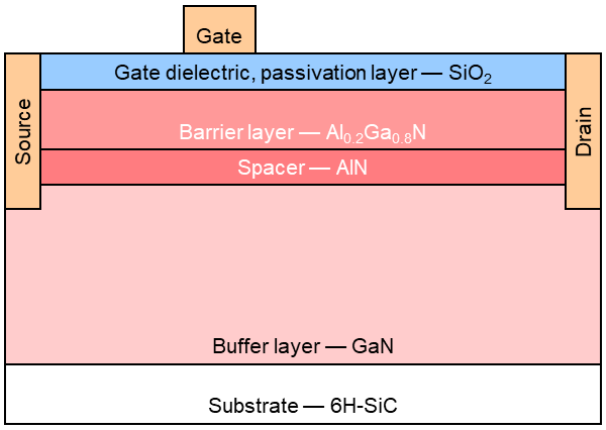


Figure 1. AlGaN/AlN/GaN MIS-HEMT device structure

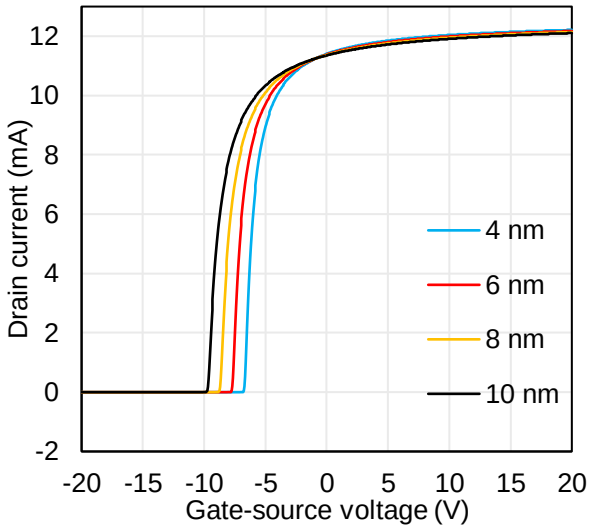


Figure 2. Drain current vs gate-source voltage characteristics for 4–10-nm-thick SiO_2 gate dielectrics

A potential barrier as high as 4.1 eV between the gate metal and SiO_2 makes the device normally off and shifts its threshold voltage deep into the negative range. The device structure with a 10-nm-thick SiO_2 layer exhibits a threshold voltage of around –10 V. The negative and forward gate current vs gate-source voltage characteristics are shown in Figs. 3 and 4 respectively.

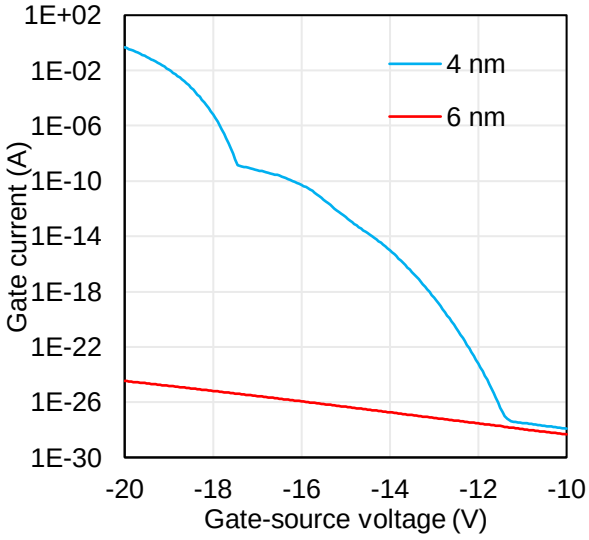


Figure 3. Gate current vs gate-source voltage characteristics for 4 and 6-nm-thick SiO_2 gate dielectrics. The gate is negatively biased

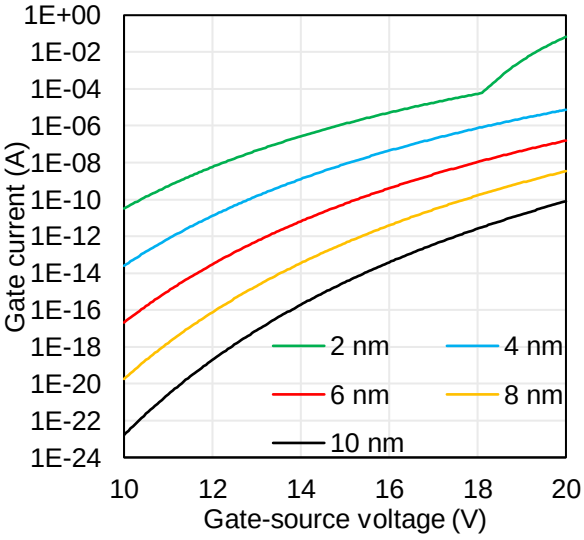


Figure 4. Gate current vs gate-source voltage characteristics for 2–10-nm-thick SiO_2 gate dielectrics. The gate is positively biased

According to our simulation results, the device structures with gate dielectric thicknesses of 6 nm or thicker can withstand high negative biases up to at least –20 V. However, a thinner 4-nm gate dielectric leads to electrical breakdown of the MIS-HEMT at approximately –11 V. The situation is entirely analogous for positive biases, where the gate leakage current of the device structure with an ultrathin 2-nm SiO_2 layer begins to rise sharply at +18 V.

IV. CONCLUSIONS

The Fowler–Nordheim tunneling current through the thin SiO_2 gate dielectric of an AlGaN/AlN/GaN MIS-HEMT at low to medium reverse and forward gate-source biases was simulated. It was shown that the leakage current through ultrathin 2–4-nm SiO_2 layers may cause electrical breakdown of the gate dielectric when the device is biased at less than ±20 V. Further study is needed to determine the SiO_2 gate dielectric thickness and the gate metal that allow the device to operate within the ±30 V range.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work is funded by grant 26-1033Б from JSC “INTEGRAL” – the Management Company of the Holding "INTEGRAL" and by grant 5.3.01 of the State Program of the Scientific Researches “Photonics and Microelectronics”.

REFERENCES

[1] Complete Transient Simulation of Flash EEPROM Devices / S. Keeney [et al.] // IEDM Technical Digest. 1990. P. 201–204. https://doi.org/10.1109/IEDM.1990.237193.

[2] Lenzlinger, M. Fowler-Nordheim Tunneling into Thermally Grown SiO_2 / M. Lenzlinger, E. H. Snow // Journal of Applied Physics. 1969. Vol. 40, № 1. P. 278–283.

[3] Baker, B. G. Photoelectric Work Function Measurements on Nickel Crystals and Films / B. G. Baker, B. B. Johnson, G. L. C. Maire // Surface Science. 1971. Vol. 24, No. 2. P. 572–586. https://doi.org/10.1016/0039-6028(71)90282-2.

[4] Monte-Carlo Simulation and Experimental Study of the Effect of Internal Charging on the Electron Emission Yield of Amorphous SiO_2 Thin Films / Q. Gibaru [et al.] // Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena. 2022. Vol. 261. Art. No. 147265. https://doi.org/10.1016/j.elspec.2022.147265.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОКА ТУННЕЛИРОВАНИЯ ПО МЕХАНИЗМУ ФАУЛЕРА – НОРДГЕЙМА ЧЕРЕЗ ПОДЗАТВОРНЫЙ ДИЭЛЕКТРИК AlGaN/AlN/GaN-МДП-ТВПЭ

Волчёк В.С.[1], Новиков Ф.П.[1], Пашкевич В.Э.[1], Гвоздовский Д.Ч.[1], Гуликова Е.А.[2]

[1]Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, vlad.volchek@bsuir.by

[2]ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Минск, Республика Беларусь

Аннотация: основной вклад в ток утечки через затвор со структурой металл–диэлектрик–полупроводник транзистора с высокой подвижностью электронов (МДП-ТВПЭ) на основе нитрида галлия вносят два физических механизма. При слабых полях в подзатворном диэлектрике преобладающим механизмом является эмиссия Пула – Френкеля. При достаточно больших полях ток утечки через подзатворный диэлектрик состоит преимущественно из тока туннелирования по механизму Фаулера – Нордгейма. Последний процесс показывает сильную зависимость от величины электрического поля и свойств диэлектрического материала, что делает его критически важным при проектировании структуры затвора транзистора. В этой статье выполнена количественная оценка тока туннелирования по механизму Фаулера – Нордгейма через тонкий слой подзатворного диэлектрика SiO_2 МДП-ТВПЭ со структурой AlGaN/AlN/GaN при малых и средних значениях обратного и прямого напряжения затвор–исток. Показано, что ток утечки через сверхтонкие (толщиной 2–4 нм) слои SiO_2 может вызывать электрический пробой подзатворного диэлектрика при напряжениях менее ±20 В.

Ключевые слова: диоксид кремния, моделирование, модель Фаулера – Нордгейма, нитрид галлия, подзатворный диэлектрик, ток туннелирования, ток утечки, транзистор с высокой подвижностью электронов.

УДК 004.04

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК В ПРОЦЕССЕ АНОДИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЯ

Яковцева В.А., Шиманович Д.Л., Гусинский А.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, yakovtseva@yahoo.com

Аннотация: выполнено моделирование макроскопических температурных полей в системе "электролит – алюминиевый образец", возникающих при электрохимическом анодировании алюминия. Определена зависимость макроскопической однородности температуры от технологических и геометрических параметров процесса. На основе полученных данных разработан алгоритм автоматического управления тепловым режимом анодирования, что обеспечивает стабилизацию условий процесса и позволяет формировать алюмооксидные покрытия с требуемыми свойствами.

Ключевые слова: электрохимическое анодирование, ванна анодирования, алюминий, моделирование температурных полей.

I. ВВЕДЕНИЕ

Для формирования пленок оксида алюминия с заданными свойствами на алюминиевых подложках наиболее распространенным и изученным методом является электрохимическое анодирование. Варьируя параметры процесса – состав электролита, режимы анодирования (постоянный, переменный или импульсный ток), температурные условия, а также применяя ультразвуковое воздействие и последующую постобработку (термообработку или наполнение пор) – можно получать оксидные пленки с необходимыми характеристиками. Данная технология позволяет создавать покрытия толщиной от нескольких микрометров до сотен микрометров.

Контроль температуры в процессе анодирования является обязательным: от температуры зависит плотность тока и скорость растворения пленки, что в свою очередь оказывает прямое влияние на характеристики покрытия. Для процесса анодирования поверхности образца важными параметрами являются: (1) макроскопическая тепловая однородность электролита в ванне; (2) мезоскопическая однородность вблизи поверхности образца; (3) микроскопическое распределение потоков вещества и тепла в порах и на масштабах основных концентрационных градиентов. Под макроскопическим масштабом понимается размер порядка самого образца, под мезоскопическим – масштаб, соответствующий тепловому или гидродинамическому пограничному слою, а под микроскопическим – масштаб микроскопических дефектов поверхности и пор травления. Следует отметить, что в данном исследовании температурные и концентрационные поля на микроскопическом уровне не рассматриваются. Целью исследования является моделирование *макроскопических* температурных полей для определения оптимальных геометрических и технологических параметров процесса, обеспечивающих максимальную однородность анодирования.

II. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Процесс анодирования характеризуется сложным взаимодействием тепло- и массообменных процессов в системе "ванна – образец – внешняя среда", которые формируют температурные поля. Ключевыми факторами, определяющими тепловую картину, выступают: конвективные потоки электролита, тепловое воздействие стенок и дна ванны, выделение джоулева тепла на поверхности анодируемого изделия, теплопроводность электролита и самого изделия, а также теплообмен зеркала электролита с окружающим воздухом.

При моделировании системы принят ряд допущений:

1. *Гидродинамика*: Поверхностные волны электролита не учитываются; на твердых границах (стенки, образец) заданы условия прилипания. Электролит рассматривается как ньютоновская жидкость. Влияние элементов крепления (подвеса, консоли) на поток исключено из рассмотрения.
2. *Теплообмен:* Стенки и дно ванны считаются изотермическими (T_0), тепловые процессы в материале стенок не моделируются. Теплообмен свободной поверхности с воздухом (T_{amb}) описывается законом свободной конвекции с постоянным коэффициентом h_{surf}.
3. *Энергетика:* Тепловыделение на образце принимается равномерным. Джоулевым нагревом электролита и самого образца пренебрегаем ввиду его малости по сравнению с электрохимическим источником; электростатическая задача не решается.

4. *Механика:* Деформации ванны и образца не учитываются.Расчетная область имеет форму прямоугольного параллелепипеда, заполненного электролитом с известными гидродинамическими и теплофизическими характеристиками. В него погружен анодируемый образец в форме параллелепипеда с однородными теплофизическими свойствами. Граничные условия для гидродинамики и теплообмена заданы в соответствии с Табл. 1. На поверхности образца учитывается условие прилипания жидкости и конвективный теплообмен с эффективными коэффициентами. Нижняя грань образца рассматривается как источник тепла, мощность которого определяется плотностью тока анодирования.

Таблица 1. Технические характеристики системы ванна-образец

	Наименование параметра	Ед.изм.	Значение
1	Внешние: ширина	мм	600
	высота	мм	300
	глубина	мм	250
2	Внутренние: ширина	мм	500
	высота	мм	260
	глубина	мм	190
3	Рабочий объем электролита	л	14
4	Типичный состав электролита		
	вода		90
	щавелевая кислота	% масс	10
5	Площадь поверхности анодирования	мм×мм	48×60 до 100×100
6	Номинальная плотность тока анодирования	мА/см^2	50 – 100
7	Мощность подогревателя термостатата	Вт	500
8	Скорость вращения лопастей перемешивателя	Об/мин	200
9	Характерное время выхода на температурный режим	мин	10
10	Рабочая температура электролита	ºС	20
11	Точность термостатической регулировки средней температуры	ºС	±1
12	Площадь образца	см^2	30 – 100
13	Мощность электрохимического тепловыделения (мах)	Вт	1500
14	Температура охлаждающей воды	ºС	10

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для анализа температурной неоднородности электролита была выполнена тепловизионная съемка его поверхности (рис. 1). Погрешность измерения относительных температур составляет ±0,05 ºС. Учитывая, что водный раствор электролита является оптически непрозрачным для длинноволнового ИК-излучения, полученные данные характеризуют температурное поле поверхностного слоя толщиной около 0,1 мм.

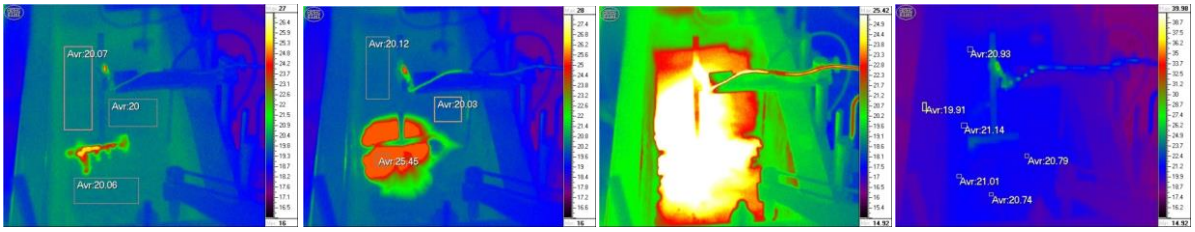


Рисунок 1. Тепловизионное изображение поверхности ванны анодирования алюминия в последовательные моменты времени после включения тока анодирования (слева направо): 1 – через 5 с, 2 – через 10 с, 3 – через 100 с, 4 – через 100 с после включения лопастного перемешивателя при том же токе анодирования

Как видно из рис. 1, начальная температура системы составляет 20 ºС. При достижении квазистационарного режима перемешивания (см. последний кадр) неоднородность температурного поля не превышает 0,5 ºС.

В рамках работы была проведена оптимизация системы для обеспечения равномерного распределения температуры как во всем объеме электролита, так и в прианодной области. Для анализа последней введено понятие «рабочей зоны» (V_0) – плоского слоя электролита толщиной h_0, прилегающего к поверхности образца. Выбор величины h_0 основан на следующих критериях: (а) наличие достаточного количества расчетных ячеек (не менее 10); (б) локализация области вблизи анода ($h_0 \ll H$); (в) сглаживание микроскопических неоднородностей поверхности; (г) учет влияния гидродинамических и тепловых пограничных слоев.

С учетом геометрии образца и указанных требований, оптимальной толщиной слоя выбрано значение h_0 = 5 мм (при условии локального сгущения расчетной сетки), которое при необходимости может быть увеличено до 10 мм.

Для оценки эффективности оптимизации введены две целевые функции:

1. σ_v - среднеквадратичное отклонение температуры по всему объему ванны:

$$\sigma_v = \frac{1}{N}\sum_i^N \frac{(T_i - \hat{T}_v)^2}{\hat{T}_v};$$

2. σ_r – среднеквадратичное отклонение температуры в пределах рабочей зоны:

$$\sigma_r = \frac{1}{N_r}\sum_i^{N_r} \frac{(T_i - \hat{T}_r)^2}{\hat{T}_r},$$

где N – общее число ячеек жидкой фазы (электролита), N_r – число ячеек рабочей зоны электролита, $\hat{T}_V = \frac{1}{N\sum v_i}\sum_i^N v_i T_i$ – среднемассовая температура электролита, v_i - объем i – й расчетной ячейки; $\hat{T}_r = \frac{1}{N_r V_r}\sum_i^{N_r} v_i T_i$- среднемассовая температура рабочей зоны электролита.

Расчетная сетка для моделирования ванны анодирования была создана в программном комплексе GAMBIT [1]. Для имитации возвратно-поступательного движения пластины в электролите применен метод скользящих сеток (sliding mesh). Общая расчетная область была разделена на два домена: стационарный (основной) и подвижный (непосредственно вокруг пластины), для каждого из которых генерировалась собственная сетка. Их последующее объединение выполнялось с помощью специализированных скриптов. Итоговая конфигурация сетки (Рис. 2) позволила корректно учесть динамику движения погруженной пластины.

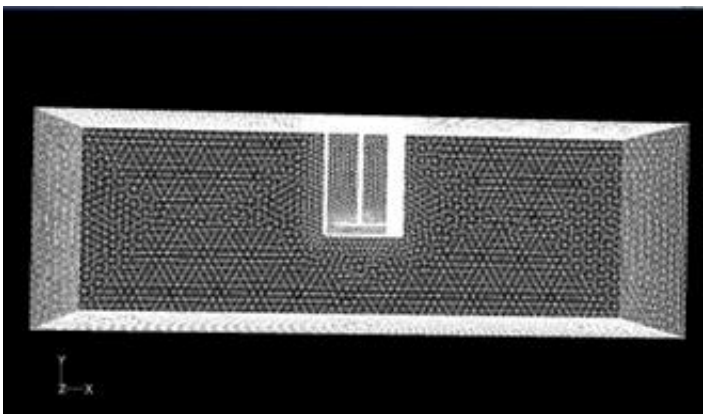


Рисунок 2. Общий вид расчетной сетки тестовой камеры

Моделирование процесса теплообмена между жидкостью и твердым телом было выполнено в программном комплексе Fluent 6.0 [2]. Математическая модель включает уравнения сохранения массы, импульса и энергии для потока жидкости, а также уравнение теплопроводности для твердой фазы. Полученная система связанных нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, как правило, не имеет аналитического решения, поэтому для ее анализа применяются методы вычислительной гидродинамики (CFD). Численная реализация задачи была осуществлена итерационными методами во Fluent 6.0 [2] с предварительной генерацией расчетной сетки в среде Gambit [1].

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, моделирование *макроскопических* полей температуры в ванне электрохимического анодирования алюминия и анодируемом образце позволило определить алгоритм поддержания температурных режимов электрохимического анодирования при изготовлении алюмооксидных подложек, что обеспечивает стабилизацию условий процесса и позволяет формировать алюмооксидные покрытия с требуемыми свойствами.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при частичной поддержке ГПНИ РБ «Современное материаловедение, перспективные материалы и новые технологии», подпрограмма 7.2 «Наноструктуры, наноматериалы и технологии», задания 2.15 и 2.6; «Фотоника и микроэлектроника»; подпрограмма 5.2 «Опто- и СВЧ-электроника для развития технологий машино- и приборостроения», задание 5.2.20 и подпрограмма 5.3 «Микроэлектрониака. Перспективные материалы и технологии», задание 5.3.08.

ЛИТЕРАТУРА

[1] “*Gambit 1.3.2* Users and Reference Manual”. Fluid Dynamics International, Fluid Dynamics Analysis Package Revision 1.3.2, Fluent Inc., 2000.

[2] “*FLUENT 6.0* Users and Reference Manual”. Fluid Dynamics International, Fluid Dynamics Analysis Package, Fluent Inc., 2001.

MODELING HEAT LOADS IN THE ALUMINUM ANODIZING PROCESS

V. Yakovtseva, D. Shimanovich, A. Gusinsky

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
yakovtseva@yahoo.com

Abstract: macroscopic temperature fields in the "electrolyte – aluminum sample" system that occur during electrochemical anodizing of aluminum have been modeled. The dependence of the macroscopic uniformity of temperature on the technological and geometric parameters of the process has been determined. Based on the data obtained, an algorithm for the automatic control of the thermal regime of anodizing has been developed, which ensures stabilization of process conditions and allows the formation of aluminum oxide coatings with the required properties.

Keywords: electrochemical anodizing, anodizing bath, aluminum, modeling of temperature fields.

УДК 621.382

КОМПАКТНАЯ (ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ) МОДЕЛЬ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА С ИЗОЛИРОВАННЫМ ЗАТВОРОМ

Нгуен Чонг Тхань, Стемпицкий В.Р.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, vstem@bsuir.by

Аннотация: в работе представлена разработка и верификация компактной (электрической) модели биполярного транзистора с изолированным затвором (БТИЗ). В основе модели лежит физически обоснованный подход, сочетающий эквивалентную схему прибора с системой уравнений, описывающих ключевые процессы: перенос носителей заряда в биполярной структуре, модуляцию проводимости базы, а также эффекты ударной ионизации. Модель была реализована на языке описания аппаратуры Verilog-A в среде Cadence. Проведено моделирование переходных процессов выключения при различных сопротивлениях затвора и снято семейство выходных статических характеристик, что подтвердило адекватность модели и ее пригодность для анализа работы прибора в реальных схемах с индуктивной нагрузкой. Преимуществом представленной компактной модели является высокая вычислительная эффективность при сохранении точности.

Ключевые слова: биполярный транзистор с изолированным затвором, компактная модель, силовая электроника, схемотехническое моделирование, Verilog-A, Cadence, выходные характеристики.

I. ВВЕДЕНИЕ

Биполярный транзистор с изолированным затвором (БТИЗ, англ. IGBT) – это силовой полупроводниковый прибор, созданный для минимизации высоких потерь в открытом состоянии, характерных для мощных полевых транзисторов. На рисунке 1,а показана структура БТИЗ, а на рисунке 1,б – его эквивалентная схема. Наличие дополнительного p-n-перехода позволяет инжектировать в эпитаксиальный слой большое количество неосновных носителей заряда. Это снижает его сопротивление в открытом состоянии благодаря эффекту модуляции проводимости. Таким образом, БТИЗ сочетает в себе высокую токовую нагрузочную способность мощного биполярного транзистора с простотой управления затвором, как у мощного полевого транзистора.

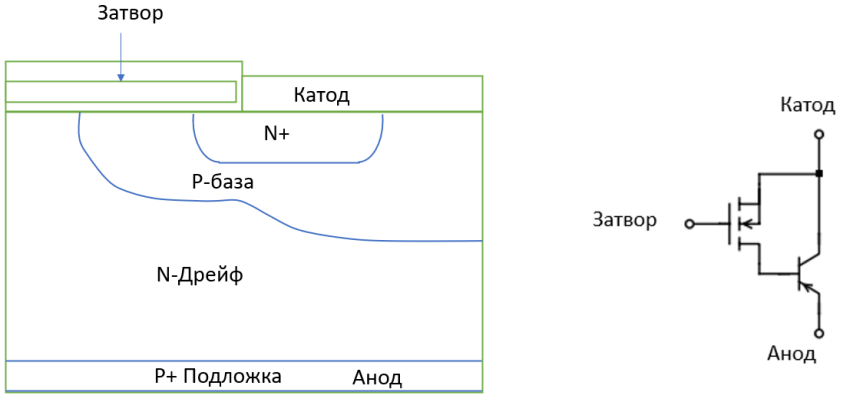


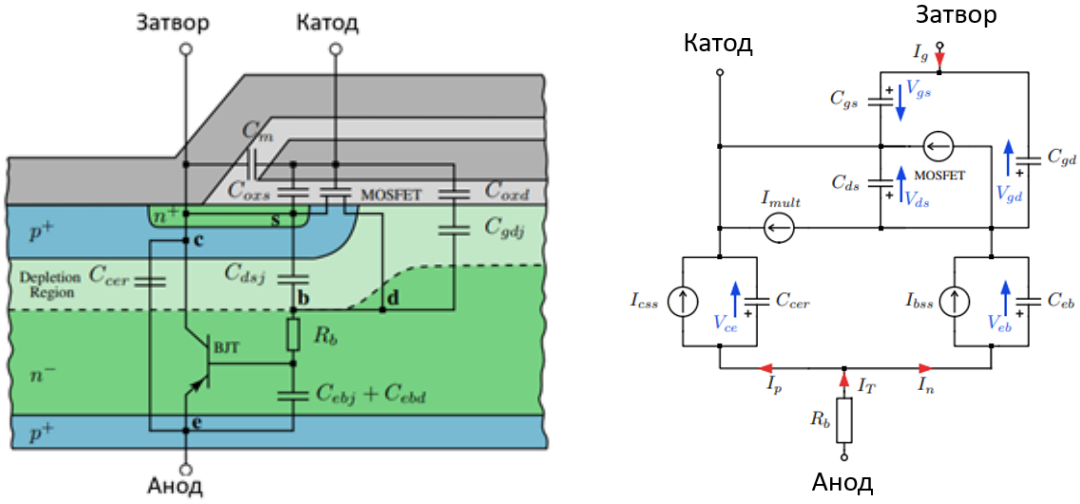
Рисунок 1. Структура NPT-БТИЗ на объемном кремнии (а) и его эквивалентная схема (б)

БТИЗ завоевали широкое признание у разработчиков в качестве альтернативы мощным биполярным транзисторам в таких применениях, как силовые преобразователи и системы приводов двигателей. Для проектирования силовых электронных схем на основе БТИЗ необходимо проводить схемотехническое моделирование, чтобы анализировать поведение приборов в составе конечного устройства. Однако модели, доступные в большинстве коммерческих симуляторов, изначально были разработаны для описания микроэлектронных компонентов и не всегда пригодны для точного моделирования БТИЗ или других силовых полупроводниковых приборов.

II. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

На рисунке 2 показана детализированная эквивалентная схема БТИЗ [1], совмещённая со структурной схемой. Элементы на схеме отображают нелинейные физические процессы, присущие различным

областям его структуры. Базовая эквивалентная схема БТИЗ, представляющая собой биполярный транзистор, управляемый базовым током, представляющим ток стока полевого транзитора, обозначена соответствующими символами на рисунке 2,а. Компоненты, подключённые к выводам эмиттера (e), базы (b) и коллектора (c), относятся к биполярной части структуры, а элементы между затвором (g), истоком (s) и стоком (d) – к части VDMOSFET. За исключением ёмкости металлизации (Cm) и оксидной ёмкости (Cox), все остальные ёмкости в модели являются сильно нелинейными. Ключевым элементом модели является применяемая в ней детализированная теория переноса носителей заряда для биполярных структур. Именно она позволяет точно рассчитывать коллекторный ток в условиях высокого уровня инжекции и совместное движение электронов и дырок внутри структуры прибора.



а б

Рисунок 2. Физическая структура и эквивалетная схема БТИЗ в соответствии с моделью NPT-IGBT [1] и моделью Хефнера-Диеболта [2]

Электрическая схема, соответствующая системе уравнений модели БТИЗ, описанной в [2], показана на рисунке 2,б. В данной модели pnp-биполярный транзистор заменён источниками тока Icss и Ibss, которые отображают установившиеся токи коллектора и базы. Для моделирования падения напряжения в электропроводящей модулированной базе сопротивление базы Rb подключено к анодному выводу [3]. Для учёта эффекта ударной ионизации и связанного с ним явления умножения носителей в области базы, при котором генерируются дырки, в модель введён дополнительный источник тока Imult [2].

Все параметры IGBT и уравнения, описывающие данную компактную модель, приведены в работе Хефнера [3].

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ В CADENCE

Компактная модель БТИЗ была реализована на языке описания аппаратуры verilog-a. На рисунке 3 показана тестовая схема для определения основных характеристик БТИЗ. Параметры элементов схемы: Rl = 30 Ом, LL = 80 мкГн, V0 = 300 В. Импульс затвора Vg имеет фронт и спад длительностью 20 нс и длительность включенного и выключенного состояния 30 мкс.

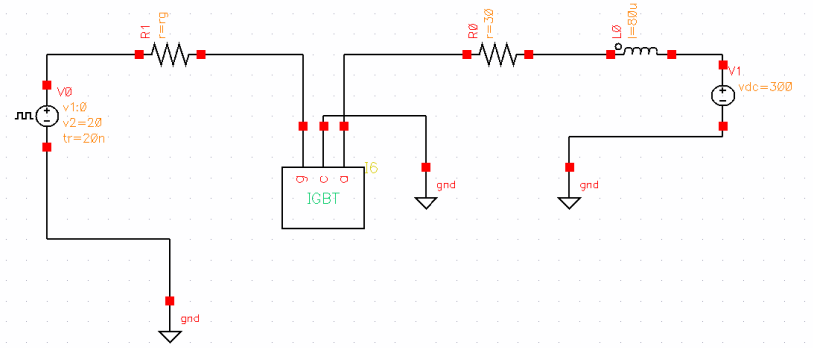


Рисунок 3. Тестовая схема с индуктивной нагрузкой для моделирования характеристик выключения IGBT

На рисунке 4 представлены результаты моделирования процесса выключения IGBT для различных значений сопротивления затвора Rg = {0.1, 1, 2, 3} кОм. На рисунке 5 представлено семейство выходных характеристик: зависимости тока коллектора Ic от напряжения коллектор-эмиттер Vce при различных напряжениях на затворе Vg = (5, 6, 7, 9 В).

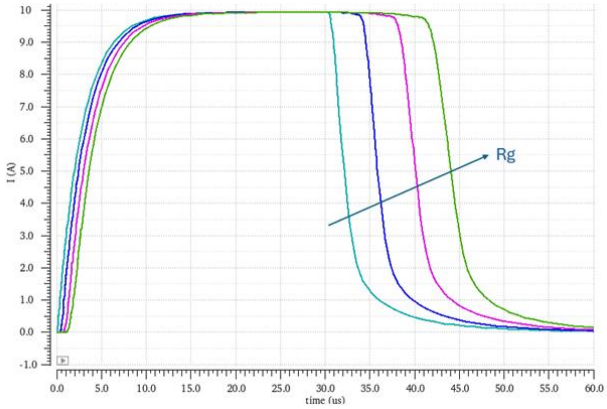


Рисунок 4. Временная диаграмма

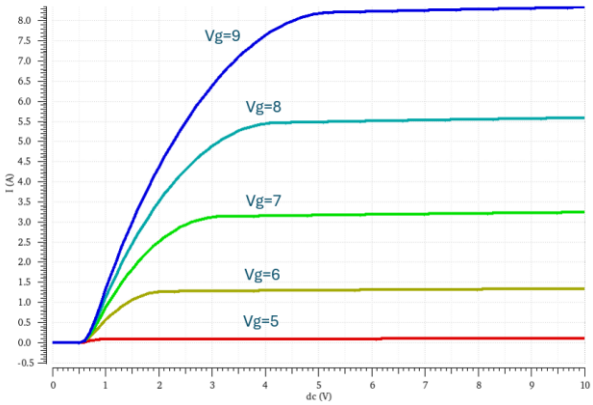


Рисунок 5. Выходные характеристики БТИЗ

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе компактная модель IGBT была успешно реализована в среде Cadence с использованием языка описания аппаратуры Verilog-A. В отличие от сложных физических моделей, требующих значительных вычислительных ресурсов, компактная модель ориентирована на точное воспроизведение внешних (терминальных) характеристик IGBT без детального моделирования внутренних физических процессов. Такой подход обеспечивает высокую вычислительную эффективность при моделировании сложных систем и обладает высокой надежностью.

ЛИТЕРАТУРА

[1] A. R. Hefner, An investigation of the drive circuit requirements for the power insulated gate bipolar transistor (igbt) // Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 6, no. 2, pp. 208–219, Apr 1991.

[2] A. R. Hefner and D. Diebolt, “An experimentally verified igbt model implemented in the saber circuit simulator,” Power Electronics, IEEE Transactions on, vol.9, no.5, pp. 532 – 542, 1994.

[3] A. R. Hefner and D. L. Blackburn, An analytical model for the steady state and transient characteristics of the power insulated-gate bipolar transistor // Solid-State Electronics, vol. 31, no. 10, pp. 1513 – 1532, 1988.

COMPACT (ELECTRICAL) MODEL OF AN INSULATED-GATE BIPOLAR TRANSISTOR

Nguyen Trong Thanh, V.R. Stempitsky

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus, vstem@bsuir.by

Abstract: this paper presents the development and verification of a compact (electrical) model of an insulated-gate bipolar transistor (IGBT). The model is based on a physically based approach combining the device's equivalent circuit with a system of equations describing key processes: charge carrier transport in the bipolar structure, base conductivity modulation, and impact ionization effects. The model was implemented in the Verilog-A hardware description language in the Cadence environment. Simulation of turn-off transients with various gate resistances was performed, and a family of output static characteristics was recorded, confirming the model's adequacy and suitability for analyzing device operation in real circuits with inductive loads. The advantage of the presented compact model is its high computational efficiency while maintaining accuracy.

Keywords. Insulated Gate Bipolar Transistor, compact model, power electronics, circuit simulation, Verilog-A, Cadence, output characteristics.

УДК 621.382

4H-SiC ТРАНШЕЙНЫЙ БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР С ИЗОЛИРОВАННЫМ ЗАТВОРОМ С НИЗКИМ ПАДЕНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ

Нгуен Чонг Тхань, Ветошкин В.В., Якуш В.С.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, nguyentrongt123@gmail.com

Аннотация: в работе представлено исследование конструкции 4H-SiC траншейного БТИЗ с P-экранирующим слоем. В состоянии запирания P-экран фиксируется при низком потенциале за счет проводимости PMOS-транзистора, обеспечивая эффективное экранирование окисла траншейного затвора от сильного электрического поля. В открытом состоянии P-экран изолирован от эмиттерного электрода слоем N-кармана, что способствует усилению эффекта инжекции носителей. При высоких напряжениях коллектор-эмиттер P-экран напрямую соединяется с эмиттером через эффект прокола (punch-through) PNP-транзистора с открытой базой, что позволяет снизить ток насыщения.

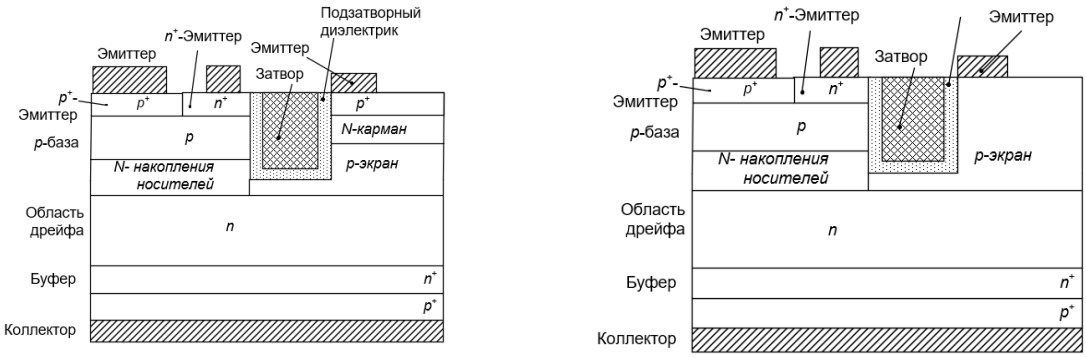
Ключевые слова: 4H-SiC БТИЗ, траншейный затвор, P-экран, SCP-IGBT, падение напряжения.

I. ВВЕДЕНИЕ

4H-SiC БТИЗ обладают сверхвысокой блокирующей способностью, высокой рабочей температурой перехода и превосходными переключательными характеристиками, что демонстрирует большой потенциал в передаче постоянного тока высокого напряжения, бестрансформаторных интеллектуальных подстанциях, преобразовании интеллектуальных сетей и так далее [1-3]. Однако в высоковольтных приложениях устройство сталкивается с проблемой надёжности оксида затвора на дне траншеи [4,5]. Для защиты оксида затвора на дне траншейного затвора были предложены структуры с заземлённым P-экраном (GS-IGBT) [6,7]. Однако, поскольку в структуре GS-IGBT слой P-экран заземлён, дырки в дрейфовой области могут напрямую уходить через эмиттер, что приводит к увеличению падение напряжения V_{on}. В данной работе исследуется предложенная новая структура: траншейный SiC IGBT с самозакреплённым P-экраном – сокращённо SCP-IGBT.

II. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Этот прибор имеет низкое падение напряжения V_{on} и низкое электрическое поле в оксиде затвора по сравнению с GS-IGBT. На рисунке 1 представлены структуры SCP-IGBT (а) и GS-IGBT(б). Все две структур IGBT используют слой накопления носителей (англ. carrier-stored layer - CSL) для улучшения компромисса между потерям E_{off} и падением напряжения V_{on} ,поскольку CSL действует как барьер для дырок, усиливая эффект инжекционного усиления (англ. Injection Enhancement - IE).



а б

Рисунок 1. Рассматриваемые структуры 4H-SiC IGBT: SCP-IGBT (а), GS-IGBT (б)

Отличие структуры SCP-IGBT от GS IGBT заключается в том, что структура SCP-IGBT имеет N-карман (N-well), расположенный между заземлённой P^+-областью и плавающим P-экраном (floating P-shield). Эта сэндвичевая структура образует биполярный PNP-транзистор. Одновременно N-карман, P^+, P-экран и траншейный затвор формируют PMOS. В закрытом состоянии электростатический потенциал P-экрана и N-кармана (V_N) возрастает с увеличением напряжения V_{ce}. Когда напряжение затвор-N-карман (V_{GN}) становится достаточно низким для достижения порогового напряжения PMOS-транзистора, последний активируется, и потенциал P-экрана фиксируется на низком уровне благодаря проводимости PMOS. В открытом состоянии N-карман играет роль глубокого потенциального барьера

для дырок, накопленных в P-экране, что значительно усиливает эффект инжекции и снижает V_{on}. При дальнейшем росте V_N в условиях высокого V_{ce} может возникнуть эффект прокола (англ. punch-through) N-кармана, когда граница области обеднения в нем достигает P-экрана. В этом случае P-экран напрямую соединяется с P^+-эмиттером, что приводит к снижению тока насыщения.

На рисунке 2 показаны зависимость тока коллектора $I_К$ от обратного напряжения на коллекторе $U_К$ при напряжении на затворе $U_З$=0 В. Обе структуры имеют одинаковое напряжение пробоя, $V_{ПРОБ}$ = 14900 В.

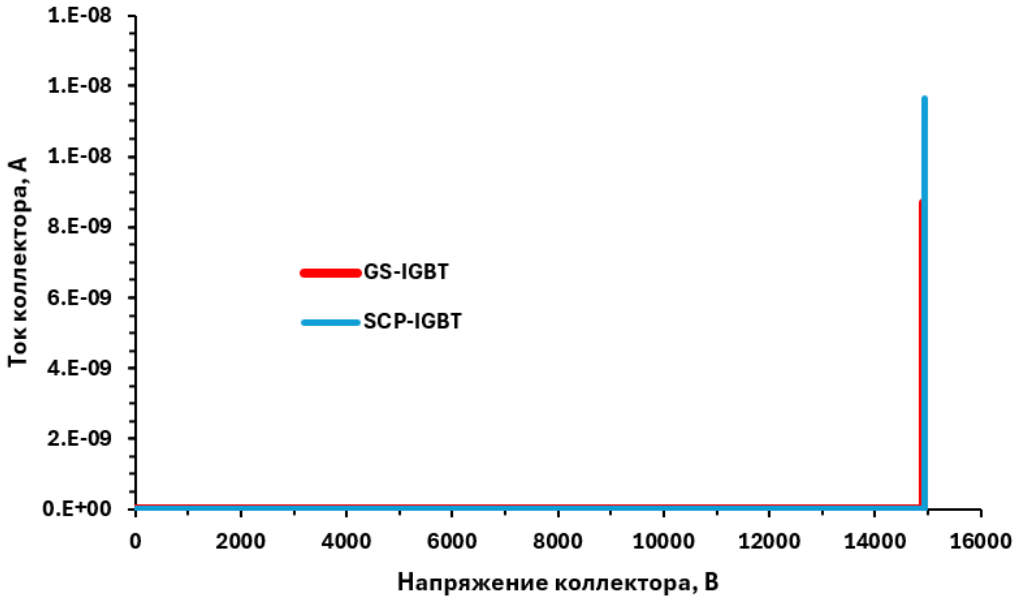


Рисунок 2. Зависимость тока коллектора $I_К$ от обратного напряжения на коллекторе $U_К$ при напряжении на затворе $U_З$ = 0 В

На рисунке 3 показаны зависимость тока коллектора $I_К$ от обратного напряжения на коллекторе $U_К$ при напряжении на затворе $U_З$=15 В.

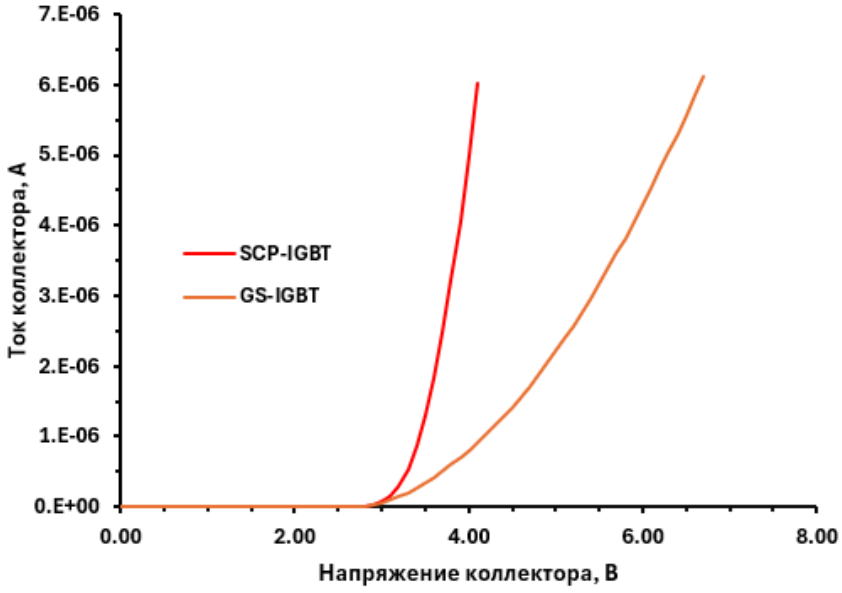


Рисунок 3. Зависимости тока коллектора от напряжения на затворе при напряжении на коллекторе равном 15 В для рассматриваемых структур

Предположим, что устройство находится во включенном состоянии, если плотность тока коллектора $J_К$ достигает 100 А/см², что соответствует величине тока коллектора $I_К = 4\times10^{-6}$ А. Тогда падение напряжения во включенном состоянии V_{on} для GS-IGBT и SCP-IGBT соответственно равны: 5,9 В и 3,9 В. Результаты моделирования показывают, что структура SCP-IGBT достигает напряжения пробоя, как и структура GS-IGBT, но имеет более низкое падение напряжения.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена и исследована перспективная структура траншейного 4H-SiC БТИЗ с самозакреплённым P-экраном (SCP-IGBT), которая позволяет успешно решить проблему надёжности оксида затвора без ухудшения характеристик в открытом состоянии. За счёт введения N-кармана и формирования скрытого PNP-транзистора, P-экран эффективно экранирует дно траншеи от высокого электрического поля при запирании, а во включенном состоянии создает глубокий потенциальный барьер для дырок, усиливая эффект инжекционного усиления. Результаты моделирования показали, что структура SCP-IGBT не только обеспечивает защиту затвора и снижение тока насыщения за счет эффекта прокола при высоких напряжениях, но и позволяет значительно уменьшить падение напряжения в открытом состоянии (с 5,9 В до 3,9 В) по сравнению с классической структурой с заземленным P-экраном (GS-IGBT) при сохранении высокого напряжения пробоя в 14900 В.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Zhang, Q. 12-kV p-Channel IGBTs With Low On-Resistance in 4H-SiC / Q. Zhang, M. Das, J. Sumakeris [et al.] // IEEE Electron Device Lett. – 2008. – Vol. 29, no. 9. – P. 1027–1029.

[2] Ryu, S. Ultra high voltage (>12 kV), high performance 4H-SiC IGBTs / S. Ryu, C. Capell, C. Jonas [et al.] // Proc. ISPSD. – 2012. – P. 257–260.

[3] Yonezawa, Y. Low Vf and highly reliable 16 kV ultrahigh voltage SiC flip-type n-channel implantation and epitaxial IGBT / Y. Yonezawa, T. Mizushima, K. Takenaka [et al.] // IEDM Tech. Dig. – 2013. – P. 6.6.1–6.6.4.

[4] Vechalapu, K. Comparative Evaluation of 15-kV SiC MOSFET and 15-kV SiC IGBT for Medium-Voltage Converter Under the Same dv/dt Conditions / K. Vechalapu, S. Bhattacharya, E. Van Brunt [et al.] // IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron. – 2017. – Vol. 5, no. 1. – P. 469–489.

[5] Kim, M. Evaluation of Long-Term Reliability and Overcurrent Capabilities of 15-kV SiC MOSFETs and 20-kV SiC IGBTs During Narrow Current Pulsed Conditions / M. Kim, J. J. Forbes, E. A. Hirsch [et al.] // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2020. – Vol. 48, no. 11. – P. 3962–3967.

[6] Kaji, N. Ultrahigh-Voltage SiC p-i-n Diodes With Improved Forward Characteristics / N. Kaji, H. Niwa, J. Suda, T. Kimoto // IEEE Trans. Electron Devices. – 2015. – Vol. 62, no. 2. – P. 374–381.

[7] Kitagawa, M. A 4500 V injection enhanced insulated gate bipolar transistor (IEGT) operating in a mode similar to a thyristor / M. Kitagawa, I. Omura, S. Hasegawa [et al.] // IEDM Tech. Dig. – 1993. – P. 679–682.

4H-SiC TRENCH INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTOR WITH LOW ON-STATE VOLTAGE DROP

Nguyen Trong Thanh, V.V. Vetoshkin, V.S.Yakush

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
nguyentrongt123@gmail.com

Abstract: this paper presents an investigation of a 4H-SiC trench IGBT structure with a P-shielding layer. In the off-state, the P-shield is fixed at a low potential due to the conductivity of a PMOS transistor, providing effective shielding of the trench gate oxide from the strong electric field. In the on-state, the P-shield is isolated from the emitter electrode by an N-well layer, which enhances the carrier injection effect. At high collector-emitter voltages, the P-shield is directly connected to the emitter through the punch-through effect of an open-base PNP transistor, which allows for a reduction in the saturation current.

Keywords: 4H-SiC IGBT, trench gate, P-shield, SCP-IGBT, voltage drop.

СЕКЦИЯ 2.
АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

УДК 621.396.677

ПРИМЕНЕНИЕ ГАУССОВСКОЙ РЕГРЕССИИ ДЛЯ БЫСТРОЙ ОЦЕНКИ ВХОДНОГО ИМПЕДАНСА МИКРОПОЛОСКОВОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Кизименко В.В., Наумович Н.М.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, kizimenko_v@bsuir.by

Аннотация: рассматривается применение гауссовской регрессии (GPR) для построения суррогатной модели прямоугольного микрополоскового излучателя, рассчитанного методом интегральных уравнений с тонкопроволочной аппроксимацией (МИУТ). Обучение выполнено на частотных зависимостях входного сопротивления, полученных МИУТ, валидация – по экспериментальным данным. Показано, что GPR воспроизводит резонансную частоту с погрешностью менее 0,1 %, что сопоставимо с точностью МИУТ и NI AWR MWO при времени предсказания порядка миллисекунд.

Ключевые слова: микрополосковый излучатель, метод интегральных уравнений, гауссовская регрессия, входной импеданс, машинное обучение, суррогатная модель, тонкопроволочная аппроксимация.

I. ВВЕДЕНИЕ

Ранее была разработана математическая модель прямоугольного микрополоскового излучателя (ПМПА) на основе метода интегральных уравнений и тонкопроволочной аппроксимации проводящей пластины (МИУТ) [1-3]. Модель обеспечивает расчет входного сопротивления и диаграммы направленности при времени анализа менее 1 с на фиксированной частоте, что на порядок быстрее полноволновых 3D-решателей. Тем не менее при решении задач оптимизации и синтеза, требующих тысяч запусков решателя, даже такая скорость оказывается ограничивающей.

Одним из современных подходов к преодолению этого ограничения является построение суррогатных моделей на основе машинного обучения. В отличие от нейронных сетей, требующих тысяч обучающих примеров, гауссовская регрессия (Gaussian Process Regression, GPR) эффективно работает на малых выборках и, что важно для инженерных приложений, дает оценку неопределенности предсказания [4]. Целью настоящей работы является исследование применимости GPR для аппроксимации частотных зависимостей входного импеданса ПМПА с размерами 17 × 11 мм на подложке Rogers RT/duroid 5870 (ε = 2,33, h = 3,175 мм).

II. МОДЕЛЬ НА ОСНОВЕ GPR

В качестве обучающей выборки использованы результаты расчета МИУТ при KSC = 1 в диапазоне 6,3 - 7,3 ГГц с шагом 0,1 ГГц. Валидация выполнена по экспериментальным данным [2, 5]. Входной признак модели - частота f; выходные величины - активная R(f) и реактивная X(f) составляющие входного импеданса.

GPR рассматривает целевую функцию как реализацию гауссовского процесса, полностью задаваемого функцией среднего (принята нулевой) и ковариационной функцией (ядром). В работе использовано ядро Matérn 5/2, хорошо описывающее гладкие, но не бесконечно дифференцируемые процессы, характерные для частотных зависимостей импеданса. Целевые переменные R и X моделировались раздельно. Обучение и предсказание выполнялись средствами библиотеки scikit-learn. На рис. 1 приведены частотные зависимости *R(f)* и *X(f)*, восстановленные GPR-моделью, в сравнении с экспериментом и расчетом МИУТ.

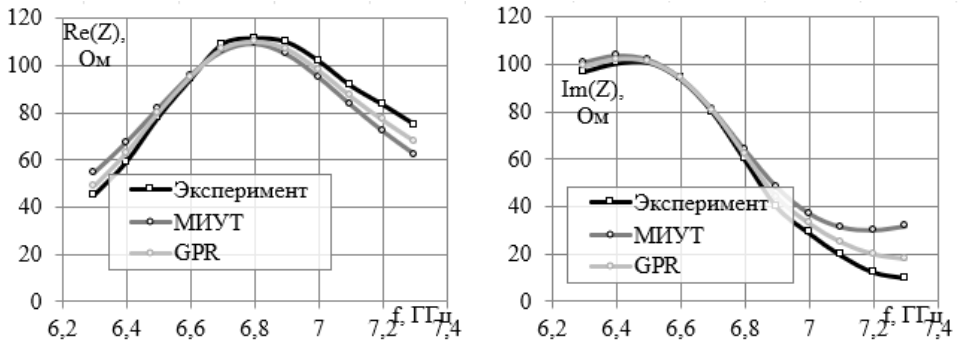


Рисунок 1. Частотные зависимости R(f) и X(f)

GPR модель воспроизводит три ключевые особенности частотной зависимости импеданса ПМПА: положение и амплитуду резонанса R (пик на 6,8 ГГц со значением 110 Ом); плавное убывание X на нижнем участке диапазона (6,3-6,9 ГГц); поведение X при f > 7,1 ГГц, где GPR дает промежуточное решение между экспериментом и МИУТ. Важно, что GPR не воспроизводит «разворот» реактивной составляющей, наблюдаемый в МИУТ при f > 7,1 ГГц. Экспериментальные данные [2] и физические соображения указывают на монотонное убывание X вплоть до резонанса тока, поэтому такое сглаживание следует рассматривать как достоинство модели: GPR выступает в роли регуляризатора, отфильтровывая артефакты численного метода. С вычислительной точки зрения обучение GPR на 11 точках занимает доли секунды, а предсказание импеданса на новой частоте — порядка 10^{-3} с, что на 3 порядка быстрее одного запуска МИУТ (< 1 с) и на 4 порядка быстрее NI AWR MWO (~8 с).

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность применения гауссовской регрессии для аппроксимации частотных зависимостей входного импеданса прямоугольного микрополоскового излучателя, рассчитанного методом интегральных уравнений с тонкопроволочной аппроксимацией. GPR модель обеспечивает точность предсказания R и X с RMSE ≈ 4 Ом и $R^2 > 0{,}96$; корректное воспроизведение резонансной частоты; ускорение расчета импеданса в 10^3-10^4 раз по сравнению с численным решателем и полноволновым моделированием. Полученный результат подтверждает перспективность гибридного подхода «МИУТ + GPR» для задач оптимизации и синтеза микрополосковых антенных решеток. Дальнейшая работа предполагает расширение обучающей выборки на геометрические и физические параметры излучателя.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Кизименко, В. В. Тонкопроволочная аппроксимация микрополоскового излучателя с учетом эффективной диэлектрической проницаемости подложки / В. В. Кизименко, А. В. Улановский // Доклады БГУИР. 2015. № 7 (69). С. 92-98.

[2] Kizimenko, V. Mathematical model of the microstrip radiator based on thin-wire approximation of metal patch / V. Kizimenko, A. Ulanouski // 2015 International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). Kharkiv, Ukraine, 2015. P. 1-3. doi: 10.1109/ICATT.2015.7136798.

[3] Кизименко, В. В. Мобильное приложение для моделирования характеристик микрополосковых антенных решеток методом интегральных уравнений / В. В. Кизименко, Н. М. Наумович // Информационные радиосистемы и радиотехнологии-2024 : материалы открытой республиканской научно-практической интернет-конференции, Минск, 21-22 ноября 2024 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. - Минск, 2024. - С. 49-51.

[4] Rasmussen, C. E. Gaussian Processes for Machine Learning / C. E. Rasmussen, C. K. I. Williams. MIT Press, 2006.

[5] Chang, E. An experimental investigation of electrically thick rectangular microstrip antennas / E. Chang, S. A. Long, W. F. Richards // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1986. Vol. 34, No 6. P. 767-772.

APPLICATION OF GAUSSIAN PROCESS REGRESSION FOR FAST ESTIMATION OF MICROSTRIP RADIATOR INPUT IMPEDANCE

V. Kizimenko, N. Naumovich

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
kizimenko_v@bsuir.by

Abstract: the paper considers the application of Gaussian Process Regression (GPR) for constructing a surrogate model of a rectangular microstrip radiator calculated by the integral equation method with thin-wire approximation. Training was performed on frequency dependences of input impedance obtained by the IE method, validation – against experimental data. It is shown that GPR reproduces the resonant frequency with an error of less than 0.1 %, and impedance components – with RMSE ≈ 4 Ohm, comparable to the accuracy of the IE method and NI AWR MWO at prediction time of the order of milliseconds.

Keywords: microstrip radiator, integral equation method, Gaussian process regression, input impedance, machine learning, surrogate model, thin-wire approximation.

УДК 681.32

ОРГАНИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСНОГО ВИЗУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ ВЫПОЛНЕНИИ ПРОЦЕДУР ОПТИМИЗАЦИИ В СИСТЕМЕ ЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТРУКТУРНЫХ ОПИСАНИЙ ЦИФРОВЫХ СХЕМ

Логинова И.П.

ОИПИ НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь, irilog@email.ru

Аннотация: для анализа результатов логической оптимизации, выполняемой с использованием параллельных вычислений в системе логической оптимизации функционально-структурных описаний дискретных устройств FLC-2, предложен комплексный подход применения таких инструментов визуализации, как диаграммы Ганта и табличные представления. Визуальные табличные представления, получаемые после завершения проектной процедуры с применением параллельных вычислений, автоматически выгружаются в базу данных SQLite и используются для оценки времени выполнения и эффективности оптимизации.

Ключевые слова: автоматизация проектирования, параллельные вычисления, цифровая схема, диаграммы, модель, база данных, OpenMP.

I. ВВЕДЕНИЕ

Рост размерности СБИС, уменьшение технологических норм приводит к усложнению процесса проектирования и подводит к необходимости использования параллельных вычислений в САПР СБИС, как одного из основных способов уменьшения времени проектирования. Возможность распараллеливания прикладных задач логического проектирования определяется рядом факторов: разработкой параллельных алгоритмов для решения прикладных задач; построением эффективных параллельных программ, реализующих эти алгоритмы; наличием технологий для реализации параллельных программ на многопроцессорной (многоядерной) архитектуре.

Большая часть программ в составе различных САПР цифровых схем, реализующих очень эффективные алгоритмы решения логико-комбинаторных задач, представлены исполняемыми кодами без привязки к архитектуре используемых вычислительных средств. Однако разработка параллельных алгоритмов для большинства логико-комбинаторных задач, возникающих в логическом проектировании цифровых схем, в принципе, невозможна [1]. Один из вариантов организации параллельных вычислений на многоядерной вычислительной системе, при осуществлении которого не потребовалась модернизации или создания новых параллельных алгоритмов решения логико-комбинаторных задач, реализован в системе логической оптимизации функционально-структурных описаний дискретных устройств FLC-2, разработанной в ОИПИ НАН Беларуси [2-4].

В основу используемого подхода положена организация параллельной работы программ, выполняющих оптимизацию с частями исходного объекта (логической схемы). На разных этапах проведения оптимизации логическая схема представляется в виде различных описаний, преобразование которых осуществляется методами детализации, экстракции, декомпозиции. При проведении этих преобразований учитываются характеристики и состояние логической схемы. С учетом этих атрибутов формируются цепочки проектных процедур и операций, составляющих маршрут проектирования. Процесс декомпозиции сопровождается проведением ряда проектных операций по выявлению и устранению информационных зависимостей между частями объекта. Результатом таких действий является разбиение на независимые части объекта проектирования, появление возможности организации параллельных вычислений с этими независимыми частями. Включение в состав системы FLC-2 проектных процедур оптимизации, которые выполняются с использованием параллельных вычислений, позволяет существенно сократить время проектирования и повысить размерность решаемых задач [2-4].

Производительность параллельной программы зависит от большого числа параметров: архитектуры вычислительной системы, непосредственно самой задачи, библиотеки поддержки выполнения, коммуникационной среды. Разработка параллельной программы требуют наличия мощного набора инструментов, позволяющих с той или иной степенью автоматизации и визуализации эффективно проводить расчеты. Графические визуализации становятся все более мощными и удобными инструментами не только для отладки и получения характеристик производительности системы, но и для понимания поведения параллельной программы во время её выполнения. Поэтому рассмотрение различных методов визуализации тех или иных аспектов поведения параллельной программы, а также построение графического отображения этих аспектов, является актуальным и представляет интерес.

В данной работе представлены несколько моделей визуальных представлений, разработанных для отображения результатов оптимизации, полученных в результате использования параллельных вычислений в системе логической оптимизации FLC-2 [2-4].

II. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ ЗАПУСК ПРОГРАММ ОПТИМИЗАЦИИ В СИСТЕМЕ FLC2

Особенно трудоемким этапом синтеза, является проведение технологически независимой оптимизации. В отдельных случаях необходимо нахождение эффективных решений для проекта, составленного из большого числа элементов. Разбиение описания логической схемы на подмножество элементов преследует цели: понижение размерности объекта оптимизации, получение оптимального решения для всех элементов, и получение оптимального решения для всего проекта. Применение некоторых проектных операций системы FLC-2 позволяет разбить проект логической схемы на совокупности не зависящих друг от друга блоков.

Разбиение на части описания проекта производится с применением ряда проектных процедур, реализующих различные методы декомпозиции. По мере необходимости проводятся проектные операции по выявлению и устранению информационных зависимостей между полученными в результате разбиения частями исходного проекта, что приводит к их преобразованию в «независимые» объекты. Независимость частей проекта, в контексте проведенных процедур декомпозиции означает, что входные аргументы для работы с одной частью проекта не определяются результатами вычислений с другими частями проекта. В итоге появляется возможность проведения параллельных вычислений без блокировок и барьерной синхронизации при выполнении проектных операций оптимизации с частями проекта. В системе FLC2 [2-4] реализована концепция организации параллельных вычислений на многоядерной вычислительной системе в стиле, называемом параллелизмом задач (task-based parallel) [5]. Согласно этой концепции в каждой задаче task можно организовать выполнение проектной операции с отдельными частями проекта логической схемы.

Организация параллельной работы выполнена с использованием технологии OpenMP [6], открытого стандарта для реализации многопоточных приложений, представленного набором различных директив, функций соответствующей библиотеки и переменных окружения. Параллельная работа программ оптимизации на многоядерном процессоре основана на работе в каждом ядре, так называемых процессов исполнения. В частности, директивы OpenMP использованы для создания пула задач, которые в ходе работы параллельной программы распределяются между потоками исполнения. Для каждого ядра автоматически создаются очереди задач, потоки исполнения в ядрах по мере выполнения одних задач берут из очереди следующие. Реализация параллелизма задач в системе FLC2 основана на следующих положениях:

– Исполняемый код программы, запущенный для выполнения, образует процесс. Средствами OpenMP, размещенными в головной программе, можно осуществить запуск нескольких параллельных процессов с исполняемыми кодами программ оптимизации.

– В каждом из параллельных процессов выполняется внешняя программа, запуск которой производится посредством команды start, аргументы которой определяют имя и аргументы запускаемой внешней программы.

– Исходные объекты необходимые для работы программ, которые выполняются в параллельных процессах, созданных головной программой, должны быть независимыми друг от друга.

Псевдокод создания параллельных (task-based) процессов с использованием директив OpenMP приведен на рисунке 1.

```
…
# pragma omp parallel for
for(i=0; i<N; i++)        // цикл по N – числу запусков выполнения внешней программы
{
# pragma omp task …       // образование новой независимой задачи
{
# pragma omp critical 1 // критическая секция 1
{ … }                     // время начала задачи , занести в трассу задачи
start (new process(…exe,…argv[…]…)); // выполнение внешней программы
# pragma omp critical 2 // критическая секция 2
{ … }                     // время окончания задачи, занести в трассу задачи
}                         // завершение кода задачи
 }                        // конец цикла – N параллельных запусков внешней программы
…
```

Рисунок 1. Фрагмент псевдокода запуска параллельного выполнения внешних программ

Данный псевдокод, иллюстрирует возможность параллельного выполнения внешних программ, которые представлены только своим исполняемым кодом. Директивы #pragma omp task определяют явные (explicit) задачи, вызывают порождение отдельных задач (task), которые могут быть немедленно исполнены потоком, встретившим эту директиву, либо же помещены в очередь и быть выполненными позже одним из потоков исполнения. В критических секциях 1 и 2, определяемых директивой #pragma omp critical, формируется трасса отдельного параллельного процесса. Средствами библиотек OpenMP определяется: время начала процесса, время завершения процесса, время выполнения программы оптимизации в каждом процессе. Анализ временных событий важен, как для оценки эффективности проведенной логической оптимизации, так и для оценки быстродействия выполнения параллельной программы.

Алгоритм реализации параллельных вычислений следующий: в головной программе запускается множество параллельных процессов (задач task); задачи динамическим образом распределяются по всем ядрам (включая логические процессоры, если они есть); у всех процессов свои адресные пространства; процессы взаимодействует с памятью независимо, в каждом процессе внешняя программа работает со своими входными данными. Когда в головной программе производится запуск другой task, создается новый (дочерний) процесс. Работа дочерних процессов может осуществляться в синхронном и асинхронном режиме. Все дочерние процессы выполняют, как правило, один код. Этот код представлен командой start, которая производит запуск консольной реализации внешней программы [4]. Аргументами команды start являются параметры командной строки программы, запускаемой в этом процессе. В случае, если в головной программе работу дочерних процессов определяла только директива #pragma omp parallel for, то в конце параллельной области происходит неявная барьерная синхронизация, т.е. все потоки (процессы) останавливаются до тех пор, пока последний поток (процесс) не выполнит свою программу целиком. Но при вставке в цикл директивы #pragma omp task синхронизация потоков отменяется, создается набор задач task, число задач определяется размером цикла, все задачи помещаются в очередь. Из очереди задачу (процесс) может выбрать один из потоков исполнения. Задач может быть намного больше числа потоков исполнения (числа ядер). Планировщик реализует формирование очереди, проводит распределение задач по потокам исполнения, применяя стратегию work-stealing [7], суть которой заключается в том, что освободившийся поток при отсутствии ожидающих задач в своей очереди заимствует задачу из очереди одного из потоков исполнения.

III. СРЕДСТВА ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ

При реализации средства визуализации могут использоваться самые различные методики сбора данных и связанный с ними способ организации работы визуального средства. Существует два различных подхода: первый и более простой в реализации – off-line анализ, а также более прогрессивный и информативный on-line анализ [8]. Off-line анализ подразумевает обработку данных после выполнения параллельной программы. Эта обработка основывается на том, что в процессе выполнения программы создается так называемая трасса (лог-журнал, содержащий информацию о ходе выполнения программы). В конкретных участках головной программы, запускающей параллельные процессы, псевдокод которой показан на рисунке 1, проводится сбор значений временных событий, происходящих в отдельных процессах. После завершения работы программы в отдельном процессе трасса этого процесса сохраняется. Для визуального анализа, реализованного в FLC2 подхода к организации параллельных вычислений, разработано программное средство визуализации [9]. Согласно данным off-line трассы, полученной в процессе работы параллельной программы, строится графическое отображение, которое дает наглядное представление о загрузке ядер процессора, о времени выполнения оптимизации для элементов проекта. Кроме временных отметок в трассе каждого процесса сохраняются: номер выполняемой в этом процессе задачи, идентификатор потока исполнения, имя выполняемой в процессе программы. Визуализация трассы параллельных процессов осуществляется путем формирования графического представления в виде модифицированных диаграмм Ганта. Перед началом работы программы визуализации формируется объединенный трассировочный off-line файл из трасс, получаемых в каждом процессе. В программе визуализации проводится: подготовка информации из трассы для графического отображения, а затем реализация графического отображения с использованием библиотеки QtCharts. Подготовка трассы заключается в организации многоуровневой сортировки хэш-таблицы, построенной по извлеченной трассировочной информации. В качестве инструмента визуализации данных трассы, используется модуль графической библиотеки QtCharts, который интегрирован с фреймворком Qt. Библиотека QtCharts является кроссплатформенной, обеспечивает высокую производительность [10], поддерживает широкий спектр разнообразных типов визуализаций (графиков, гистограмм, диаграмм и др.). Для графического отображения выбрана диаграммы в виде горизонтальной диаграммы с накоплением (HorizontalStackedBarChart). Этот тип диаграммы представляет данные трассы в виде

горизонтально сложенных столбцов, сгруппированных по следующим категориям: по вертикали представлено распределение процессов по ядрам процессора; по горизонтали представлена шкала времени выполнения параллельной программы. В горизонтальном столбце «последовательное сложение» блоков разной длины определяется порядком выполнения процессов в заданном ядре. Размер каждого блока определяется временем выполнения оптимизации в одном процессе. Это время вычисляется при анализе временных событий в трассе отдельного процесса.

IV. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИСТРОГРАММ И ТАБЛИЦ СОВМЕСТНО С МОДЕЛЯМИ ДАННЫХ

Для организации комплексного визуального анализа, суть которого заключается в реализации разных вариантов визуализации одних и тех же данных, используется архитектура шаблона Model/View (Модель/Представление), которая является модификацией шаблона MVC [11]. Архитектура Model/View имеет более простую структуру, при этом механизм хранения данных и работа с ними отделены от их представления. Такое разделение позволяет отображать одни и те же данные в нескольких разных представлениях и реализовывать новые типы представлений без изменения базовых структур данных. На рисунке 2 представлена архитектура шаблона, который использует одну Модель (источник данных) для одновременного представления данных из модели двумя способами: в виде таблицы и в виде диаграмм. Согласно схеме работу по обновлению данных между источником данных и Моделью берет на себя Представление.

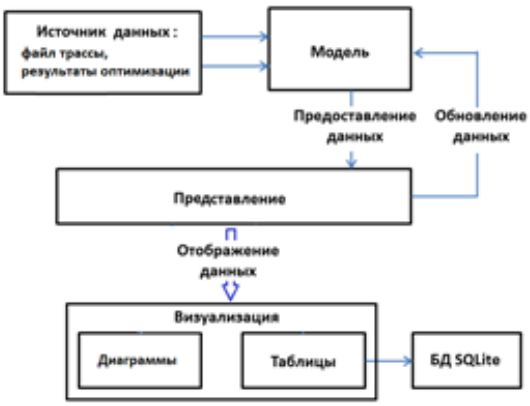


Рисунок 2. Архитектура шаблона M/V при работе с трассой параллельных процессов

Процесс работы в этой архитектуре выглядит следующим образом. Модель взаимодействует с источниками данных (трасса параллельных процессов или, например, статистика, предоставляемая FLC2 по результатам работы процедур оптимизации), обеспечивая интерфейс для других компонентов архитектуры. Представление через Модель может взаимодействовать с данными, в частности, может получать данные и отображать их. Для отображения в Представлении применяется программа визуализации, описанная выше. Когда данные трассы изменяются, программа визуализации напрямую взаимодействует с Моделью, уведомляя ее об изменении данных. Модель с данными, можно отображать как на гистограмме, так и в таблице. Пример визуализации двух представлений (в виде диаграммы и в виде таблицы) приведен на рисунке 3.

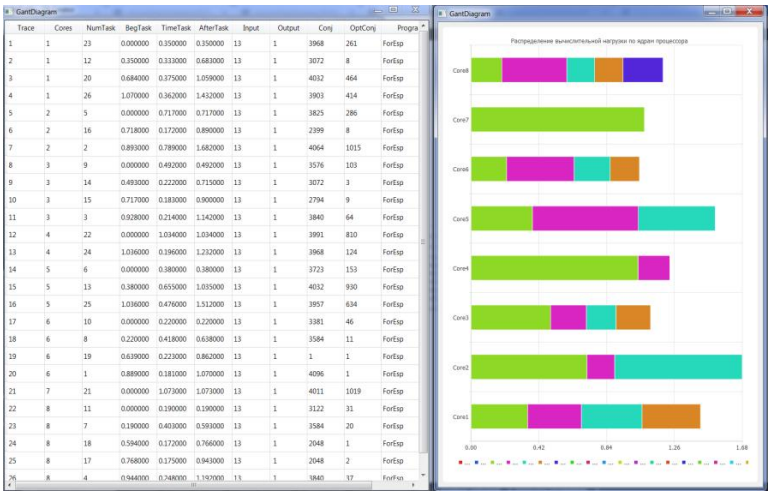


Рисунок 3. Визуализация Модели в виде диаграммы и в виде таблицы (для схемы из 26-ти блоков)

Эти представления визуализации получены после проведения оптимизации логической схемы, которая разделена на 26 независимых блоков. Представление в виде таблицы содержит информацию трасс всех процессов с указанием событий, начиная от идентификатора процесса, номера ядра, номера задачи и всех временных меток начала (столбец BegTask), длительности (столбец TimeTask) и завершения каждой задачи (столбец AfterTask). Кроме того, таблица дополнена следующей информацией, полученной при проведении оптимизации логической схемы: для каждого блока приводятся структурные параметры (число входов, число выходов, число конъюнкций) до и после оптимизации, имя программы, которая проводила оптимизацию с этой частью схемы. При более подробном рассмотрении диаграммы и таблицы можно отметить, что расположение данных в этих визуальных представлениях синхронизированы друг с другом.

Интеграция в FLC2 средств комплексного визуального анализа в значительной степени способствует решению проблемы сохранения полученных при экспериментах с разными проектами результатов и их дальнейшей структуризации. Данные можно хранить как в модели, так и выгружать в базу данных. Программа визуализации позволяет выгружать данные, сформированные Моделью в виде табличного представления, в такие же таблицы реляционной базы данных SQLite посредством всего одного запроса. Архитектура M/V и средства платформы Qt предоставляет возможностью работы с SQLite [10]. SQLite – это компактная встроенная система управления базами данных (БД), для которой не нужен отдельный сервер, запускать и работать с ней можно в системе, где проводится проектирование. Все данные эта БД хранит в одном файле, доступ к ним осуществляется локально. SQLite работает по реляционной модели, то есть все данные в базе данных связаны в виде таблиц. SQLite используют язык структурированных запросов SQL для хранения и обработки информации. Интеграция Модели базы данных и Модели визуальных табличных представлений позволяют организовать сериализацию данных из табличного представления в таблицы базы данных. После создания и подключения БД одним SQL-запросом выгружается все содержание таблицы, представленной визуальным образом. Текущее изменение БД SQLite в зависимости от выбранной стратегии обновления определяется обновлениями данных Модели в программе визуализации. Таким образом, таблицы в БД создаются, обновляются и добавляются согласно запросам, которые формируются той или иной стратегией обработки данных, полученных при проведении оптимизации.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена методика реализации средств визуального анализа данных в системе логической оптимизации FLC2, которые позволяют провести интеграцию нескольких подходов: визуализации результатов, полученных при проведении оптимизации, в виде табличного представления и визуального представления off-line трассы, формируемой при выполнении параллельных процессов. Визуализация трассы осуществляется путем формирования графического представления в виде горизонтальной диаграммы с накоплением (диаграммы Ганта), которая дает представление о распределении задач по ядрам многоядерного процессора.

Методика получения двух визуальных представлений на основе единой модели данных и связывания визуального табличного представления с встроенной базой данных SQLite помогает проанализировать и оценить эффективность распараллеливания в различных маршрутах логического проектирования, осуществляет автоматическую сериализацию в таблицах реляционной базы данных SQLite результатов выполнения различных оптимизационных процедур. Сохранение в БД всей информации из визуального табличного представления в определенной мере автоматизирует сбор и накопление статистики о результатах оптимизации логических схем в разных маршрутах проектирования. Применение методов машинного обучения при извлечении информации из этих табличных данных предоставляет возможность выбора наиболее эффективной программы оптимизации для логической схемы с теми или иными параметрами. Выбор в результате обучения на табличных данных БД SQLite наиболее эффективной программы оптимизации приведет к получению наилучшего решения логико-комбинаторных задачи оптимизации, как с точки зрения увеличения быстродействия, так и нахождения оптимальных характеристик логической схемы.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Черемисинов, Д.И. Использование параллельных вычислений при автоматизированном проектировании СБИС / Д.И. Черемисинов, Л.Д. Черемисинова // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2016. Сборник трудов / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. – М.: ИППМ РАН, 2016. Часть – С. 32-39.

[2] Бибило, П.Н. Система логической оптимизации функционально-структурных описаний цифровых устройств на основе продукционно-фреймовой модели представления знаний /П. Н. Бибило, В. И. Романов // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем - (МЭС-2020) : IX

Юбилейная Всероссийская научно-техническая конференция : Сборник трудов ; под общей ред. А. Л. Стемпковского. – Москва : ИППМ РАН, 2021 Москва : ИППМ РАН, 2020-.С. 9–16.

[3] Логинова, И.П. Использование технологий параллельных вычислений для систем с общей памятью на примере задачи минимизации булевых функций / И.П. Логинова // Информационные технологии в промышленности, логистике и социальной сфере (ITI*2019) : тезисы докладов X Международной научно-технической конференции (23 – 24 мая 2019 года, Минск). – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2019. – С. 130 – 133.

[4] Логинова, И.П. Анализ быстродействия при реализации параллельных вычислений для решения задач оптимизации в системе логического проектирования / И. П. Логинова // IX Международная научно-практическая конференция «BIG DATA and Advanced Analytics» (BIG DATA 2023): Сборник научных статей в 2 ч. Ч. 1, (Республика Беларусь, Минск, 17-18 мая 2023 г.). – Минск: БГУИР, 2023. – С. 365–378.

[5] J. Ciesko, S. Mateo, X. Teruel, X. Martorell, E. Ayguadé, J. Labarta, A. Duran, B. R. de Supinski, S. Olivier, K. Li, and A. E. Eichenberger, Towards Task-Parallel Reductions in OpenMP. Cham: Springer International Publishing, 2015, pp. 189–201.

[6] Антонов, А. С. Параллельное программирование с использованием технологии OpenMP / А. С. Антонов. – Москва: Изд-во МГУ, 2009. 78 с.

[7] Кучумов, Р.И. Реализация и анализ Work-Stealing планировщика задач // Стохастическая оптимизация в информатике. 2016. Т. 12, № 1. С. 20–39.

[8] Васёв П.А, Бахтерев М.О., Манаков Д.В., Поршнев С.В. Элементы систем научной визуализации // ГрафиКон 2022: 32-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 19-22 сентября 2022 г., Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, Рязань, Россия, С. 304–315.

[9] Логинова, И. П. Визуализация трассы параллельной программы в системе проектирования / И. П. Логинова // Информационные технологии и системы 2024 (ИТС 2024) – Information Technologies and Systems 2024 (ITS 2024): материалы междунар. науч. конф., Минск, 20 нояб. / редкол.: Л. Ю. Шилин [и др.]. – С. 89–90.

[10] Осипов, Д.Л. Программирование на C++ в среде Qt / Д.Л. Осипов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2026. – 816с.

[11] Гамма Э., Хелм Р., Джонсон Р., Влиссидес Дж. Паттерны объектно-ориентированного проектирования. – СПб.: Питер, 2020. – 448 с.

ORGANIZATION OF COMPLEX VISUAL ANALYSIS IN PARALLEL EXECUTION OPTIMIZATION PROCEDURES IN THE SYSTEM OF LOGICAL OPTIMIZATION OF FUNCTIONAL AND STRUCTURAL DESCRIPTIONS OF DIGITAL CIRCUITS

I. Loginova

United Institute of Informatics Problems of NAS of Belarus, irilog@email.ru

Abstract: to analyze the results of logical optimization performed using parallel computing in the system of logical optimization of functional–structural descriptions FLC-2, it is proposed to use a comprehensive approach involving visualization tools such as Gantt charts and tabular representations. The visual tabular representations obtained after completing the design procedure of optimization using parallel computing are automatically uploaded to the SQLite database and are used to evaluate the execution time and efficiency of the optimization.

Keywords: computer-aided design, parallel computing, digital circuit, diagram, model, database, Open MP.

UDC 004.056.5

DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR MONITORING INFORMATION SECURITY OF SOCIAL NETWORKS

I.G. Tagangylyjov, K.S. Artyklyyev

Oguz han Engineering and Technology University of Turkmenistan, Ashgabat, Turkmenistan,
i.tagangylyjov@etut.edu.tm

Abstract: this paper addresses the design of a monitoring system intended to assess and maintain the information security of social network platforms and their users. The proposed system architecture combines automated content monitoring, account and bot-behavior analysis, malicious-link and phishing detection, and data-leakage tracking into a unified pipeline built on classical rule-based filters and machine-learning classifiers. The paper describes the functional modules of the system, the data flow between them, and the criteria used to prioritize alerts for human moderators. Limitations related to scalability, privacy constraints, and evasion by malicious actors are discussed, along with directions for further development.

Keywords: information security, social networks, security monitoring, bot detection, phishing detection, data leakage, machine learning.

I. INTRODUCTION

Social network platforms accumulate large volumes of personal, behavioral, and communication data, which makes them an attractive target for a wide range of threats: account compromise, phishing and malicious links distributed through posts and messages, automated bot networks used for disinformation or fraud, and unauthorized leakage of user data through third-party applications and application programming interfaces (APIs). Manual moderation cannot keep pace with the scale of user-generated content, which motivates the development of automated monitoring systems capable of continuously assessing the security state of a platform and flagging incidents for timely response [1-5].

The goal of this work is to describe the architecture and core functional components of a system for monitoring the information security of social networks, covering both platform-level threats (compromised accounts, bot activity) and content-level threats (malicious links, data leakage) within a single monitoring pipeline.

II. SYSTEM ARCHITECTURE

The proposed monitoring system consists of four principal modules operating over a shared event stream collected from platform activity logs, posts, messages, and account metadata: (1) a content monitoring module, (2) an account and behavior analysis module, (3) a link and phishing detection module, and (4) a data-leakage tracking module. Each module produces a risk score for the object under analysis (post, account, or outgoing data transfer), and an aggregation layer combines these scores using weighted rules to generate prioritized alerts for security analysts and moderators.

Incoming data is first normalized and passed through a rule-based pre-filter that removes low-risk, well-known benign patterns, reducing the load on the subsequent machine-learning components. This two-stage design allows the system to process high volumes of events while reserving computationally expensive analysis for content flagged as potentially suspicious.

III. CONTENT AND BEHAVIOR MONITORING

The content monitoring module applies natural-language processing techniques, including keyword and pattern matching combined with text classification models, to detect posts and messages containing harassment, hate speech, disinformation, or coordinated inauthentic messaging. Classification models are trained on labeled examples of policy-violating content and are periodically retrained to adapt to evolving language patterns used to evade detection.

The account and behavior analysis module evaluates account-level features such as posting frequency, temporal patterns, network of connections, and similarity to known bot signatures. Graph-based analysis of the social connection network helps identify clusters of accounts exhibiting coordinated behavior, which is characteristic of bot networks and inauthentic amplification campaigns, while anomaly-detection models flag individual accounts whose behavior deviates sharply from established user baselines, a pattern often associated with account takeover.

IV. LINK, PHISHING, AND DATA-LEAKAGE MONITORING

The link and phishing detection module inspects URLs shared within the platform against reputation databases, lexical features of the URL string, and, where feasible, sandboxed analysis of the linked page's

content and redirect chain, allowing detection of both known and newly registered phishing domains before they reach a significant number of users.
The data-leakage tracking module monitors data flows to third-party applications connected through the platform's API, comparing requested data scopes against the platform's data-sharing policy and flagging integrations that request excessive permissions or exhibit unusual data-export volume, which may indicate misuse of user data beyond its intended purpose.

V. ALERT AGGREGATION AND PRIORITIZATION

Risk scores produced by the four modules are combined by an aggregation layer that accounts for the severity, confidence, and potential reach of a detected issue – for example, a phishing link shared by a highly connected account is prioritized above the same link shared by an isolated one. Aggregated alerts are routed to human moderators through a triage queue, and confirmed incidents are fed back into the training data of the relevant module, enabling continuous improvement of detection accuracy over time.

VI. LIMITATIONS AND CHALLENGES

Several challenges affect the practical deployment of such a system. First, scalability is a concern, since large platforms generate content at a rate that requires efficient, often distributed, real-time processing infrastructure. Second, privacy regulations constrain the extent to which user data and communications can be automatically analyzed, requiring careful design of data minimization and access-control measures within the monitoring pipeline itself. Third, malicious actors continuously adapt their tactics to evade detection, including the use of adversarially crafted content and slowly evolving bot behavior designed to mimic genuine users, which necessitates ongoing model retraining and periodic manual review of detection rules. Finally, an overly aggressive system risks a high rate of false positives, which can burden moderators and negatively affect legitimate users, making the calibration of alert thresholds an important design consideration.

VII. CONCLUSION

The described system combines content monitoring, behavioral analysis, phishing detection, and data-leakage tracking into a unified pipeline for maintaining the information security of social network platforms. A two-stage architecture, in which lightweight rule-based filtering precedes machine-learning-based analysis, allows the system to operate at scale while retaining the ability to detect complex, evolving threats. Future work should focus on improving robustness against adversarial evasion, refining alert prioritization to reduce moderator workload, and extending the architecture to comply with evolving data-protection requirements.

REFERENCES

[1] Fire, M., Goldschmidt, R., Elovici, Y. Online social networks: Threats and solutions // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2014. – Vol. 16, No. 4. – P. 2019–2036.
[2] Cresci, S. A decade of social bot detection // Communications of the ACM. – 2020. – Vol. 63, No. 10. – P. 72–83.
[3] Varol, O., Ferrara, E., Davis, C., Menczer, F., Flammini, A. Online human-bot interactions: Detection, estimation, and characterization // Proceedings of the International AAAI Conference on Web and Social Media. – 2017.
[4] Aleroud, A., Zhou, L. Phishing environments, techniques, and countermeasures: A survey // Computers & Security. – 2017. – Vol. 68. – P. 160–196.
[5] Beigi, G., Liu, H. A survey on privacy in social media: Identification, mitigation, and applications // ACM Transactions on Data Science. – 2020. – Vol. 1, No. 1. – P. 1–38.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Тагангылыджов И.Г., Артыклыев К.С.

Огузханский инженерно-технологический университет Туркменистана, Ашхабад, Туркменистан

Аннотация: в статье рассматривается разработка системы мониторинга, предназначенной для оценки и поддержания информационной безопасности платформ социальных сетей и их пользователей. Предложенная архитектура объединяет автоматизированный мониторинг контента, анализ поведения аккаунтов и ботов, обнаружение вредоносных ссылок и фишинга, а также отслеживание утечек данных в единый конвейер на основе классических правил и классификаторов машинного обучения. Описаны функциональные модули системы, потоки данных между ними и критерии приоритизации оповещений для модераторов. Рассмотрены ограничения, связанные с масштабируемостью, требованиями конфиденциальности и попытками обхода системы злоумышленниками, а также направления дальнейшего развития.

Ключевые слова: информационная безопасность, социальные сети, мониторинг безопасности, обнаружение ботов, обнаружение фишинга, утечка данных, машинное обучение.

УДК 004.056.52

АЛГОРИТМ ВНЕДРЕНИЯ ВОДЯНЫХ ЗНАКОВ В VHDL-ОПИСАНИЯ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ, РЕАЛИЗУЕМЫХ НА FPGA

Лавренова А.С., Иванюк А.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, anastasialavrenova566@gmail.com

Аннотация: в работе представлен подход к автоматизированному исследованию устойчивости аппаратных водяных знаков, внедряемых в параметры INIT LUT-блоков FPGA, к синтезу и оптимизации в САПР [1-2]. Ключевым результатом исследования является разработка программного средства, позволяющего автоматизировать процесс защиты интеллектуальной собственности, а также детально изучать механизмы сохранения скрытой информации на этапах синтеза, размещения и трассировки. Для повышения криптостойкости водяного знака предложен метод псевдослучайного распределения битов по свободным ячейкам памяти конфигурации LUT-блоков с использованием LFSR. Эксперименты выявили уязвимость водяного знака к оптимизации САПР и показали, что для его сохранения необходимо применять специальные приёмы обеспечения устойчивости.

Ключевые слова: аппаратные водяные знаки, VHDL, FPGA, САПР, LUT-блок, LFSR.

I. ВВЕДЕНИЕ

Разработка цифровых устройств на языке VHDL с последующей реализацией в программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) требует значительных интеллектуальных затрат. Традиционные правовые механизмы не всегда предотвращают несанкционированное копирование, обратное проектирование и модификацию проектных описаний [3]. В связи с этим актуальной задачей становится создание эффективных методов защиты HDL-описаний, среди которых особое место занимают аппаратные водяные знаки, которые позволяют скрытно внедрить идентификационную информацию в структуру устройства.

Основной проблемой внедрения водяных знаков через модификацию INIT-параметров LUT-блоков является их уязвимость к процессу синтеза в системах автоматизированного проектирования (САПР). Синтезатор оптимизирует схему, удаляя избыточные логические связи, что может привести к стиранию скрытой идентификационной информации. В рамках исследования проведена проверка того, как оптимизации САПР влияют на сохранность водяных знаков. В качестве инструмента решения задачи разработано программное средство, обеспечивающий автоматизированный анализ VHDL-кода, внедрение водяных знаков и их защиту от оптимизации САПР.

II. ОБОСНОВАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОГО СПОСОБА ВНЕДРЕНИЯ ВОДЯНЫХ ЗНАКОВ

Базовым элементом комбинационной логики в архитектурах FPGA являются LUT-блоки. LUT-блок представляет собой конфигурируемое статическое оперативное запоминающее устройство (СОЗУ), где логическая функция определяется таблицей истинности [4], задаваемой параметром инициализации INIT. Для LUT-блока с n-входами размер параметра INIT составляет 2^n бит.

Водяной знак (watermark, далее – WM) – это скрытая идентификационная информация, внедряемая в цифровой объект для подтверждения прав интеллектуальной собственности. В предлагаемом подходе в качестве контейнера для водяного знака используются недостижимые (свободные) адреса таблицы истинности LUT-блока, не влияющие на реализуемую логическую функцию. Анализ VHDL-проектов показал, что среднее количество LUT2-блоков относительно всех LUT-блоков составляет 24,2%, LUT3 – 20,2%, LUT4 – 24,2%, LUT5 – 16,1%, LUT6 – 15,3%. Таким образом среднее количество свободного места в проектах составило 2640 бит, что показывает возможность внедрения водяного знака соответствующей длины без использования дополнительных аппаратных ресурсов.

При реализации логической функции с числом входов меньшим, чем присутствует в выбранном LUT-блоке часть адресного пространства оказывается функционально неиспользуемой. Количество недостижимых (свободных) адресов, которые могут быть использованы для скрытого хранения данных без нарушения работоспособности схемы, вычисляется по формуле:

$$C_{wm} = 2^n - 2^m, \quad (1)$$

где C_{wm} – ёмкость контейнера водяного знака в LUT-блоке, m - количество входов которые требуются для реализации целевой логической функции.

На рисунке 1 показан базовый принцип использования свободных адресов таблицы истинности LUT4-блока для скрытого хранения данных без изменения функционального поведения схемы.

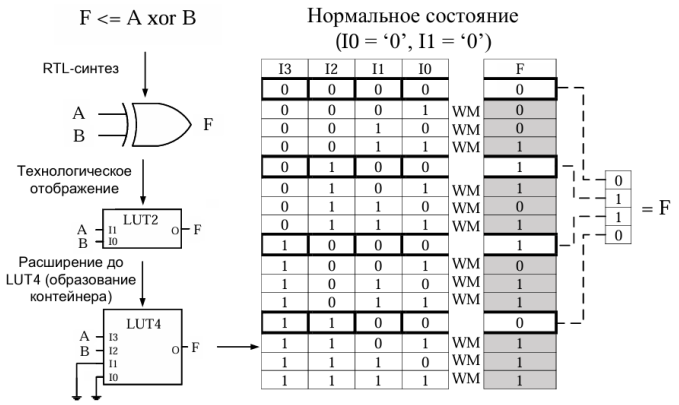


Рисунок 1. Принцип использования свободных ячеек LUT4-блока для внедрения водяного знака

Водяной знак может быть любой размерности, не превышающей максимальную ёмкость контейнера. Простое линейное расположение битов по возрастанию адресов уязвимо к анализу, так как делает закономерности внедрения предсказуемыми для злоумышленника. Для повышения криптостойкости метода внедрения и устойчивости к атакам на обнаружение знака используется механизм псевдослучайной перестановки индексов свободных ячеек на основе линейного регистра сдвига с обратной связью (LFSR) [5]. LFSR, инициализированный секретным ключом и произвольный примитивный неприводимый полином обратной связи, генерирует последовательность псевдослучайных чисел, используемую для построения перестановки. Алгоритм внедрения водяного знака с использованием LFSR проиллюстрировано на рисунке 2.



Рисунок 2. Алгоритм внедрения водяного знака с использованием LFSR

Алгоритм внедрения включает анализ VHDL-кода, определение свободных ячеек LUT-блока и генерацию псевдослучайной перестановки индексов на основе LFSR с заданным ключом и полиномом. Для определения множества $\boldsymbol{A}$ достижимых адресов ячеек памяти параметра INIT используется следующая формула:

$$\boldsymbol{A} = (j \mid \boldsymbol{OC}(j) = 1), j \in \{0, 1, \dots, 2^n - 1\}, |\boldsymbol{A}| = 2^{HW(\boldsymbol{OP})}, \quad (2)$$

где n – число входов LUT-блока; $\boldsymbol{OP} = (p^{n-1}, \dots, p^1, p^0)$ – вектор занятости входов LUT-блока; $p^i \in \{0,1\}$, причём $p^i = 1$ означает, что вход i используется, а $p^i = 0$ – что вход зафиксирован константой; $HW(\boldsymbol{OP})$ – вес Хэмминга вектора $\boldsymbol{OP}$, равный числу используемых входов; j – номер ячейки памяти конфигурации LUT-блока (параметр INIT); $\boldsymbol{OC}$ – вектор занятости памяти конфигурации LUT-блока; $\boldsymbol{OC}(j) \in \{0,1\}$ – признак занятости ячейки, где $\boldsymbol{OC}(j) = 1$ соответствует достижимому адресу, а $\boldsymbol{OC}(j) = 0$ – свободному адресу. В результате множество $\boldsymbol{A}$ содержит номера всех достижимых ячеек INIT, количество которых равно $2^{HW(\boldsymbol{OP})}$.

Адреса, не вошедшие в этот вектор, образуют множество свободных ячеек, которое и используется в качестве контейнера для водяного знака.

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты проводились на тестовом проекте – 8-входовом мультиплексоре, реализованном на трех блоках LUT6 в среде Xilinx Vivado 2021.1. Третий блок LUT имеет три входа, фиксированные в логическом нуле, что предоставляет 56 свободных ячеек для внедрения знака. В качестве тестового водяного знака использовалась 16-битная последовательность 0001001000110100 (hex: 0x1234). Первый эксперимент показал, что при внедрении знака без защитных атрибутов синтезатор Vivado выполняет агрессивную оптимизацию: блок LUT6 с фиксированными входами сокращается до LUT3, а

недостижимые адреса удаляются. В результате водяной знак теряется полностью. Для сохранения знака исследовались три метода маскирования, исключающих оптимизацию LUT-блока:

1. Атрибут DONT_TOUCH: запрещает синтезатору структурные преобразования блока.

2. Ложные сигналы: замена констант '0' на выражения вида $d(i)\ xor\ d(i)$ с атрибутом DONT_TOUCH, что маскирует факт фиксированных входов.

3. Генератор константных значений (CVG – Constant Value Generator [2]): введение последовательностной логики для усложнения структуры схемы.

Структурные схемы синтезированных устройств для указанных конфигураций приведены на рисунках 3 и 4. Для наглядности на схемах скрыты буферы ввода-вывода (IBUF, OBUF), автоматически вставляемые САПР, логическая структура и параметры LUT-блоков отображены без изменений.

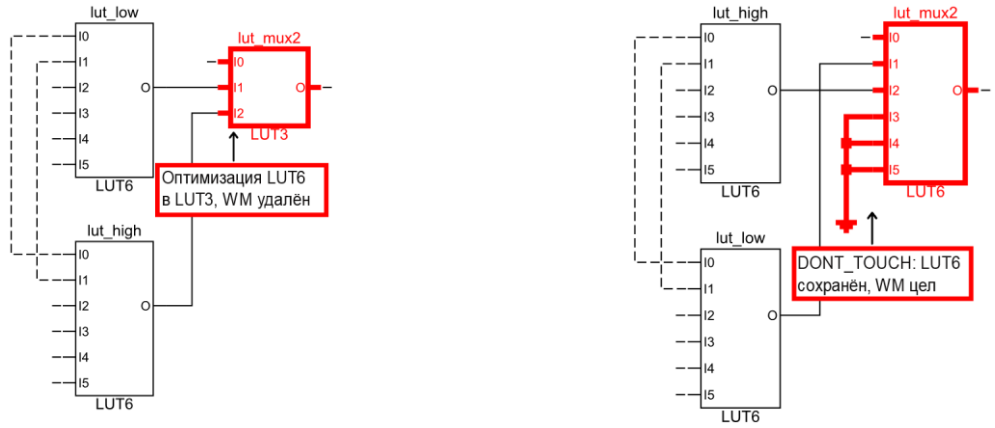


Рисунок 3. Схема после синтеза без метода защиты и с атрибутом DONT_TOUCH

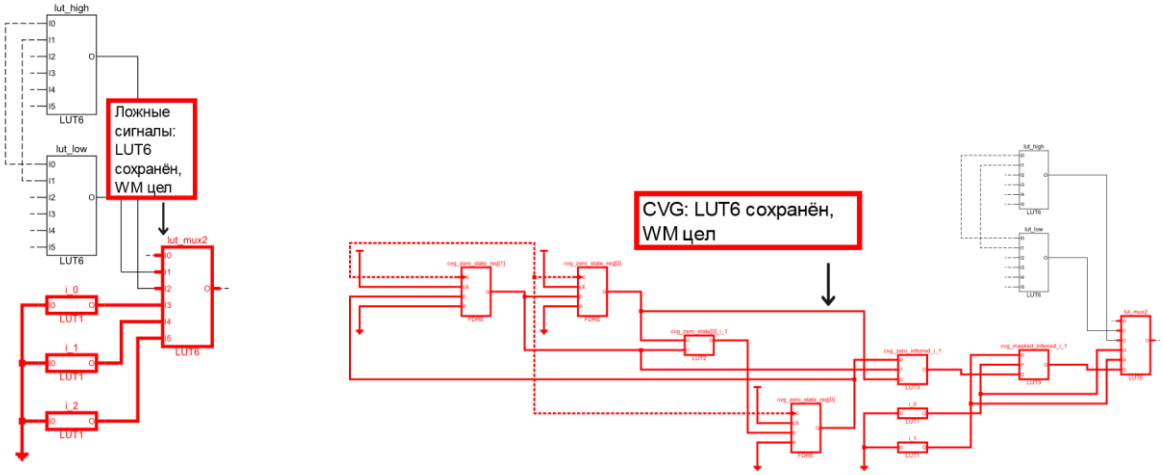


Рисунок 4. Схема после синтеза с использованием ложных сигналов и CVG

Сравнительный анализ влияния различных методов защиты на аппаратные ресурсы приведен в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительный анализ ресурсоемкости и энергопотребления

Вариант реализации	Кол-во LUT-блоков	Типы LUT-блоков	Триггеры	Полная мощность (Вт)
Без защиты	3	2 × LUT6, 1 × LUT3	0	1,657
DONT_TOUCH	3	3 × LUT6	0	1,657
Ложные сигналы	6	3 × LUT6, 3 × LUT1	0	1,654
CVG	8	3 × LUT6, 2 × LUT3, LUT2, 2 × LUT1	3	1,711

Результаты показывают, что:

1. Метод DONT_TOUCH не увеличивает ресурсы, но структура схемы остается прозрачной для анализа, что снижает степень скрытности знака.

2. Метод с ложными сигналами удваивает число LUT-блоков (добавляются LUT1 для генерации нулей), но эффективно маскирует константы, усложняя обратное проектирование.

3. Использование CVG переводит часть схемы в синхронный режим, увеличивая потребление энергии до 1,711 Вт из-за переключательной активности триггеров, однако обеспечивает наивысшую сложность анализа структуры для злоумышленника.

Во всех защищенных конфигурациях функциональная эквивалентность сохранялась, а максимальная рабочая частота не снижалась критически. Экспериментально подтверждено, что простой метод внедрения уязвим к оптимизациям САПР, тогда как предложенные механизмы маскирования обеспечивают сохранность знака с приемлемыми накладными расходами.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования установлено, что внедрение водяных знаков в VHDL-описания через модификацию INIT-параметров LUT-блоков является уязвимым к оптимизациям современных САПР без применения дополнительных защитных мер. Простое внедрение приводит к удалению скрытой информации на этапе синтеза. Разработанный программный модуль позволил автоматизировать процесс оценки устойчивости знака и доказать, что эффективным решением является использование механизмов маскирования. Результаты работы могут быть использованы для защиты HDL-проектов при разработке сложных цифровых устройств.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают искреннюю благодарность резиденту ПВТ компании «Инженерный Центр Ядро», которая является одним из центров разработки YADRO, за предоставленное оборудование для проведения экспериментов в рамках работы совместной учебной лаборатории с Белорусским государственным университетом информатики и радиоэлектроники.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Проектирование встраиваемых цифровых устройств и систем / А. А. Иванюк. Минск, 2012.

[2] Обзор методов реализации аппаратных водяных знаков в цифровых устройствах программируемой логики / В. В. Сергейчик, А. А Иванюк. Минск, 2015.

[3] Majzoobi, M. Introduction to hardware security and trust / M. Majzoobi, F. Koushanfar, M. Potkonjak. N.Y.: Springer, 2011.

[4] Метод внедрения цифровых водяных знаков в аппаратные контейнеры с LUT-ориентированной архитектурой / К. Защелкин, Е. Иванова // Информатика и моделирование, 2013.

[5] Digital Watermarking and Steganography / I. Cox [et al.] – Burlington: Elsevier, 2008.

ALGORITHM FOR EMBEDDING WATERMARKS IN VHDL DESCRIPTIONS OF DIGITAL DEVICES IMPLEMENTED ON FPGA

A.S. Lavrenova, A.A. Ivaniuk

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
anastasialavrenova566@gmail.com

Abstract: this paper presents an approach to the automated study of the robustness of hardware watermarks embedded in the parameters INIT of FPGA LUT-blocks against synthesis and optimization in CAD [1-2]. The key result of the research is the development of specialized tools that automate the process of intellectual property protection and also enable a detailed study of the mechanisms for preserving hidden information during synthesis, placement, and routing. To increase the cryptographic strength of the watermark, a method of pseudorandom distribution of bits among free cells of LUT-blocks using an LFSR is proposed. Experiments revealed the vulnerability of the watermark to CAD optimization and showed that special techniques for ensuring robustness must be applied to preserve it.

Keywords: hardware watermarks, VHDL, FPGA, CAD, LUT-block, LFSR.

УДК 004.896:004.056.5

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ОБНАРУЖЕНИЯ ФИШИНГОВЫХ URL НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Свиридчук И.Л., Малькевич К.Д.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, isl06work@gmail.com

Аннотация: в работе рассматривается задача автоматизированного проектирования интеллектуальных систем обнаружения фишинговых веб-ресурсов. Предложен подход к созданию классификатора URL-адресов на основе методов машинного обучения, интегрируемый в архитектуру систем информационной безопасности. Проведён сравнительный математический анализ двух моделей: Random Forest и BERT. Исследованы их теоретические свойства, вычислительная сложность и качество классификации. Показано, что выбор архитектуры определяется требованиями к точности и производительности, что соответствует задачам автоматизированного проектирования адаптивных систем защиты.

Ключевые слова: автоматизация проектирования, машинное обучение, обнаружение фишинга, Random Forest, BERT, системы защиты информации.

I. ВВЕДЕНИЕ

Современные системы информационной безопасности требуют автоматизированных решений для оперативного выявления угроз. Проектирование таких систем включает выбор архитектуры, методов обработки данных и алгоритмов принятия решений. В данной работе рассматривается задача автоматизированного проектирования классификатора фишинговых URL как компонента системы защиты, способного принимать решения без участия человека. Обнаружение фишинговых ресурсов по строке URL без обращения к содержимому страницы является актуальной задачей, решение которой может быть интегрировано в браузерные расширения, почтовые фильтры и межсетевые экраны. С формальной точки зрения задача сводится к построению бинарного классификатора [1]:

$$f: \sum^{*} \to \{0,1\},$$

где Σ^{*} – множество всех возможных строк URL, а f – решающее правило, относящее URL к легитимным (0) или фишинговым (1).

II. МОДЕЛЬ RANDOM FOREST

а. Дерево решений

Random Forest – это ансамблевый метод, строящий множество решающих деревьев. Каждое дерево в отдельности является классификатором, а объединение их решений позволяет снизить ошибку за счёт уменьшения дисперсии. Базовым классификатором в Random Forest является бинарное дерево решений. В каждом узле v проверяется условие $x_j<\theta_v$, где j – номер признака, θ_v – пороговое значение, p_c – доля примеров класса c в узле D. Для оценки качества разбиения используется индекс Джини [2]:

$$G(D) = 1 - \sum_{c=0}^{1} p_c^2,$$

При разбиении узла на левую (D_L) и правую (D_R) части вычисляется прирост чистоты:

$$\Delta G = G(D) - \frac{|D_L|}{|D|} G(D_L) - \frac{|D_R|}{|D|} G(D_R).$$

Индекс Джини достигает минимума (G=0), когда все примеры в узле принадлежат одному классу, и максимума (G=0.5), когда классы распределены поровну. Таким образом, дерево стремится к разбиениям с минимальным G(D). Дерево выбирает такое разбиение, которое максимизирует ΔG. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнута максимальная глубина или пока узлы не станут чистыми.

б. Ансамблирование

Однако одно дерево склонно к переобучению – оно может идеально классифицировать обучающую выборку, но плохо работать на новых данных. Чтобы уменьшить ошибку обобщения, Random Forest строит T деревьев, каждое на своей бутстрап-выборке. Доля примеров, не попавших в выборку [3]:

$$lim_{N\to\infty}(1-\frac{1}{N})^N = e^{-1} \approx 0.368.$$

Дополнительная случайность вводится при выборе признаков в каждом узле ($m \approx \sqrt{d}$, где d — общее число признаков). Это снижает корреляцию между деревьями и улучшает обобщающую способность ансамбля. Снижение корреляции напрямую влияет на ошибку обобщения ансамбля. Ошибка обобщения E ограничена сверху, где ρ – средняя корреляция между деревьями, σ^2 – их средняя сила. Поскольку E пропорциональна ρ, уменьшение корреляции за счёт случайного выбора признаков приводит к снижению ошибки обобщения:

$$E \leq \rho \cdot \frac{1-\sigma^2}{\sigma^2}.$$

Сложность обучения: O(T·d·N log N). Сложность предсказания: O(T·d). Это делает Random Forest пригодным для высоконагруженных систем автоматизированной защиты.

III. МОДЕЛЬ BERT

а. Механизм внимания

BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) представляет собой модель глубокого обучения, которая решает ту же задачу минимизации, но принципиально иным способом. Метод основан на архитектуре Transformer [4]. Ключевой элемент – механизм масштабированного скалярного произведения-внимания. Для матриц запросов Q, ключей K и значений V. Механизм внимания позволяет модели учитывать контекст каждого символа URL относительно всех остальных:

$$Attention(Q,K,V) = softmax\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}}\right)V,$$

В отличие от рекуррентных сетей, BERT обрабатывает последовательность токенов $t_1,\ldots,t_n$ параллельно, учитывая контекст как слева, так и справа. Это достигается за счёт того, что в механизме внимания BERT отсутствует маскировка будущих позиций. Каждый токен может "общаться" с любым другим токеном в последовательности, независимо от его положения. Это позволяет модели улавливать контекстные зависимости, которые невозможно обнаружить при одностороннем анализе. Классификационное решение принимается на основе скрытого состояния токена [CLS]: $h_{[CLS]} \in R^{768}$.

б. Функция потерь и оптимизация

Обучение BERT – это настройка параметров θ для минимизации ошибки классификации. В качестве меры ошибки используется кросс-энтропия, где θ– параметры модели, а $y_i^{(c)}$ – индикатор того, что i-й пример принадлежит классу:

$$L(\theta) = -\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\sum_{c=0}^{1} y_i^{(c)}\, log\, P(y_i = c \mid s_i;\theta).$$

Кросс-энтропия штрафует модель, когда она уверенно ошибается: если модель предсказывает вероятность 99% для неверного класса, логарифм даёт большое отрицательное число, и после смены знака ошибка становится большой. Для минимизации этой функции используется оптимизатор AdamW [5]. Его ключевая идея – адаптивно регулировать скорость обучения для каждого параметра. Он использует две скользящие средние: инерция (среднее градиента), ускоряющая движение в постоянном направлении (m_t); адаптация (среднее квадрата градиента), уменьшающая шаг, если градиент сильно колеблется.

$$\hat{m}_t = \frac{\beta_1 m_{t-1} + (1-\beta_1)\nabla L(\theta_t)}{1-\beta_1^t}, \qquad \hat{\vartheta}_t = \frac{\beta_2 \vartheta_{t-1} + (1-\beta_2)(\nabla L(\theta_t))^2}{1-\beta_2^t}.$$

Если градиент для какого-то параметра сильно колеблется, $\sqrt{\hat{\vartheta}_t}$ становится большим, и шаг уменьшается. Если градиент стабильный, шаг увеличивается; $\epsilon=10^{-8}$ – малая константа, добавленная в знаменатель для предотвращения деления на ноль на ранних шагах обучения; $\eta\lambda\theta_t$ – L2-регуляризация (weight decay), штрафующая большие веса. Маленькая скорость обучения $\eta=2\times10^{-5}$ критически важна: BERT уже предобучен на огромном корпусе текстов, и слишком большие шаги могут разрушить его знания. Адаптивность AdamW позволяет безопасно настраивать модель под задачу классификации URL. Финальное обновление параметров, где $\eta\frac{\hat{m}_t}{\sqrt{\hat{\vartheta}_t}+\epsilon}$ – адаптивный градиентный шаг с учётом инерции и стабильности:

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \eta \frac{\hat{m}_t}{\sqrt{\hat{\vartheta}_t} + \epsilon} - \eta\lambda\theta_t.$$

Сложность внимания: $O(n^2 \cdot d)$, где n – длина последовательности (до 128 токенов), d – скрытая размерность (768). Это значительно выше, чем у Random Forest, что отражается в значении.

IV. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Экспериментальное сравнение моделей проводилось на основе публичного датасета malicious_phish.csv с платформы Kaggle [6], содержащего 651191 URL. Из полученного набора сформирована случайная выборка объёмом N = 30 000 примеров с фиксированным random_state = 42 для воспроизводимости. Для каждой модели данные разделялись на обучающую и тестовую выборки в соотношении 80/20. Random Forest обучался на 11 лексических признаках с гиперпараметрами n_estimators = 100. BERT дообучался на выборке из 5 URL в течение 4 эпох с оптимизатором AdamW ($\eta = 2\times10^{-5}$), что обусловлено ограниченными вычислительными ресурсами и необходимостью быстрой проверки работоспособности модели.

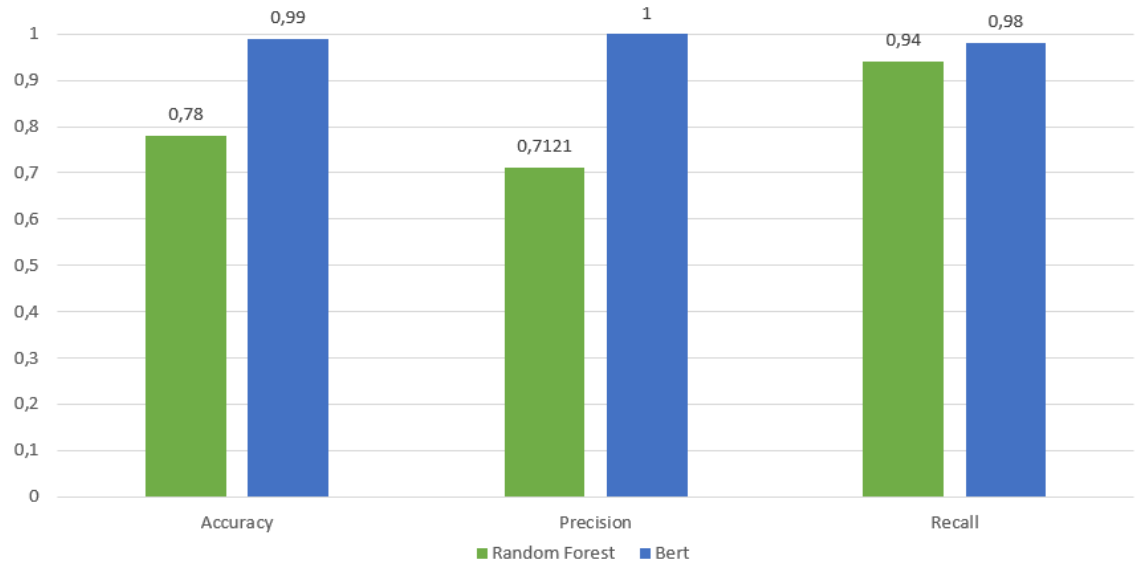


Рисунок 1. Сравнительные характеристики моделей

Для оценки качества классификации использовались следующие метрики. Accuracy – доля правильных ответов среди всех примеров: Accuracy=(TP+TN)/(TP+TN+FP+FN), где TP – верно определённые фишинговые URL, TN – верно определённые безопасные URL, FP – безопасные URL, ошибочно принятые за фишинговые, FN –фишинговые URL, не распознанные моделью. Precision – доля правильно определённых фишинговых URL среди всех URL, которые модель назвала фишинговыми: Precision=TP/(TP+FP). Этот показатель отвечает на вопрос: «Когда модель говорит, что URL фишинговый – можно ли ей верить?». Низкая Precision означает много ложных тревог. Recall – доля правильно обнаруженных фишинговых URL среди всех фишинговых URL в выборке: Recall=TP/(TP+FN). Этот показатель отвечает на вопрос: «Сколько фишинговых URL модель смогла найти?» Низкий Recall означает, что модель пропускает угрозы.

Random Forest достиг точности 78%. Высокий Recall (0.94) означает, что модель обнаруживает большинство фишинговых URL, но низкая Precision (0.71) указывает на значительное число ложных срабатываний – около 29% URL, определённых как фишинговые, на самом деле безопасны. BERT обеспечил точность 99%. Идеальная Precision (1.00) означает отсутствие ложных тревог – ни один безопасный URL не был ошибочно заблокирован. При этом BERT обнаруживает 98% фишинговых URL.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена задача автоматизированного проектирования классификатора фишинговых URL. Проанализированы две архитектуры: Random Forest и BERT. Показано, что Random Forest представляет собой эффективное решение для систем реального времени благодаря низкой вычислительной сложности и интерпретируемости. BERT обеспечивает максимальную точность за счёт глубокого контекстного анализа, но требует значительных ресурсов. Предложенный подход к проектированию позволяет автоматизировать выбор архитектуры на основе заданных критериев.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Devlin, J. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding / J. Devlin, M.-W. Chang, K. Lee, K. Toutanova // arXiv preprint arXiv:1810.04805. – 2018.

[2] Hastie, T. The Elements of Statistical Learning / T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedman. – 2nd ed. – New York : Springer, 2009. – 745 p.

[3] Breiman, L. Random Forests / L. Breiman // Machine Learning. – 2001. – Vol. 45, No. 1. – P. 5–32.

[4] Vaswani, A. Attention Is All You Need / A. Vaswani [et al.] // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2017. – P. 5998–6008.

[5] Kingma, D. P. Adam: A Method for Stochastic Optimization / D. P. Kingma, J. Ba // ICLR. – 2015.

[6] Malicious URLs dataset [Electronic resource] // Kaggle. – Mode of access: https://www.kaggle.com/datasets/sid321axn/malicious-URLs-dataset. – Date of access: 07.09.2026.

AUTOMATION OF DESIGNING PHISHING URL DETECTION SYSTEMS BASED ON MACHINE LEARNING

I.L. Svirydchuk, K.D. Malkevich

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
isl06work@gmail.com

Abstract: the paper addresses the problem of automated design of intelligent systems for detecting phishing web resources. An approach to creating a URL classifier based on machine learning methods, integrated into the architecture of information security systems, is proposed. A comparative mathematical analysis of two models – Random Forest and BERT – has been carried out. Their theoretical properties, computational complexity, and classification quality have been studied. It has been shown that the choice of architecture is determined by the requirements for accuracy and performance, which corresponds to the tasks of automated design of adaptive protection systems.

Keywords: design automation, machine learning, phishing detection, Random Forest, BERT, information protection systems.

УДК 004.8:539.3

ДВУХЭТАПНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ УПРУГОЙ ПЛАСТИНЫ С ПОМОЩЬЮ CNN И GAN

Матвеева А.И.[1], Новокшенов А.Д.[1], Карчевская А.С.[1], Боровков А.И.[1], Щербаков С.С.[2,3], Подгайская Д.А.[3], Мендель А.В.[3]

[1]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, matveeva_ai@spbstu.ru

[2]Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

[3]Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Аннотация: представлена двухэтапная схема прогнозирования топологии упругой пластины при ограничении объемной доли материала. Сверточная нейронная сеть (CNN) строит поле плотности материала с конечно-элементным разбиением 32 × 32 по условиям закрепления и нагружения, генеративно-состязательная сеть (GAN) повышает конечно-элементное разбиение до 128 × 128. Для 20 вариантов приложения нагрузки эталонные топологии получены методом SIMP с конечно-элементным анализом; шесть случаев составили тестовую выборку. Предсказания воспроизводят расположение основных несущих элементов и общую конфигурацию эталонных решений высокого разрешения.

Ключевые слова: топологическая оптимизация; упругая пластина; CNN; GAN; SIMP.

I. ВВЕДЕНИЕ

При проектировании несущих частей корпусов радиоэлектронных устройств необходимо сочетать жесткость и ограничение массы. Распределение материала в заданной области можно определить методами топологической оптимизации. Наиболее распространен метод SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) [1, 2]: каждому конечному элементу сопоставляют псевдоплотность в диапазоне от 0 до 1, а модуль упругости элемента задают степенной зависимостью от нее с параметром штрафа p. На каждой итерации выполняют конечно-элементный расчет, вычисляют производные податливости по псевдоплотностям и обновляют распределение материала до сходимости. При анализе семейства близких случаев нагружения повторная оптимизация для каждого положения силы требует значительных вычислительных затрат.

Модели машинного обучения позволяют аппроксимировать связь между условиями нагружения, закрепления и распределением материала после предварительного формирования набора эталонных решений. Обзор современных подходов показывает различие между ускорением итерационной оптимизации и прямым прогнозом топологии [3]. Сверточные нейронные сети применяют для ускорения итерационной оптимизации по промежуточным распределениям плотности [4]; условные генеративно-состязательные сети (cGAN) применяют для синтеза структур по заданным условиям [5, 6].

Отдельная задача состоит в получении топологии высокого разрешения. Нейросетевое повышение разрешения топологии, полученной при грубом разбиении [7], и двухэтапные архитектуры [8–10] позволяют сначала определить общую несущую структуру, а затем детализировать распределение материала. В рассматриваемой схеме для обучения второго этапа используются эталонные топологии, независимо рассчитанные при разбиении на 128 × 128 конечных элементов.

В настоящей работе исследуется двухэтапная схема CNN–GAN для линейно-упругой пластины при изменении узла приложения сосредоточенной силы. Сверточная нейронная сеть (CNN) предсказывает поле плотности материала с конечно-элементным разбиением 32 × 32 по условиям нагружения и закрепления, а генеративно-состязательная нейронная сеть (GAN) увеличивает конечно-элементное разбиение до 128 × 128. Цель исследования – сопоставить прогнозы с независимо рассчитанными эталонными решениями SIMP и определить пределы выводов, которые допускает малый набор расчетных случаев.

II. ПОСТАНОВКА И МЕТОД

Рассматривается квадратная изотропная пластина со стороной 1 см. Одна сторона жестко закреплена, а сила 1 кН в разных расчетных случаях приложена к разным узлам противоположной границы. Модуль упругости материала E = 0,1603 МПа, коэффициент Пуассона v = 0,32. Решается задача минимизации податливости при ограничении объемной доли материала. В демонстрационных расчетах объемная

доля материала составляет 0,30. Для каждого из 20 положений нагрузки методом SIMP с конечно-элементным анализом независимо получены эталонные топологии при разбиении области на 32 × 32 и 128 × 128 конечных элементов. Входные данные сети включают четыре узловые матрицы 33 × 33 с компонентами силы и признаками закреплений, а также объемную долю.

На первом этапе сверточная сеть архитектуры «энкодер–декодер» преобразует граничные условия в поле плотности 32 × 32. На втором этапе генеративно-состязательная сеть повышает разрешение до 128 × 128. Второй этап обучается по отдельно рассчитанным эталонам высокого разрешения, а не по интерполированным изображениям. Набор разделен на обучающую и тестовую выборки в соотношении 14:6. Расчет эталонных решений занял 4 ч 27 мин, обучение CNN было остановлено на 122-й эпохе. Функция потерь CNN – среднеквадратичная ошибка (MSE) между предсказанным и эталонным полями плотности; использованы оптимизатор Adam и размер пакета 16 (рисунок 1).

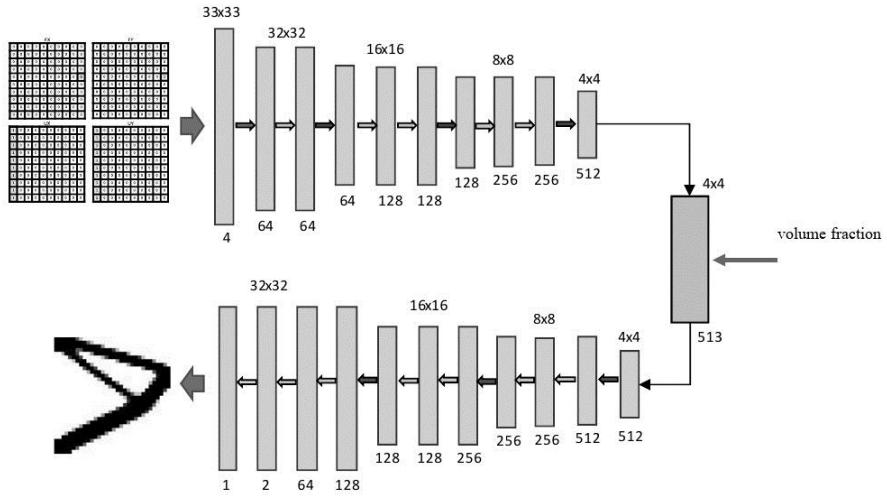


Рисунок 1. Схема CNN для прогноза поля плотности 32 × 32 по условиям нагружения и закрепления

В двух из четырех входных матриц записаны проекции приложенной силы на оси x и y. Две другие матрицы показывают, в каких узлах заданы ограничения перемещений u_x и u_y. Сверточный энкодер понижает пространственную размерность карт признаков, а декодер восстанавливает поле плотности. Заданная объемная доля вводится во внутреннее представление сети.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На шести тестовых случаях предсказания в целом воспроизводят расположение несущих элементов эталонных решений. На рисунке 2 представлены две пары эталонных и прогнозных топологий высокого разрешения. При остановке обучения CNN на 122-й эпохе значение функции потерь MSE составляло 0,0099.

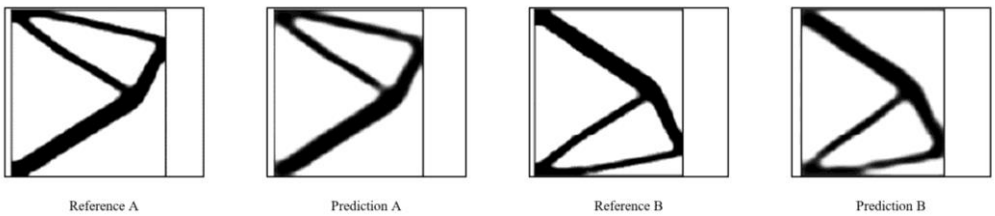


Рисунок 2. Два тестовых случая: эталонные топологии и прогнозы высокого разрешения

Второй этап повышает пространственное разрешение прогноза с 32 × 32 до 128 × 128 без повторного решения конечно-элементной задачи для каждого нового случая. На вход генератора подается прогноз CNN с разрешением 32 × 32. Дискриминатор получает пары из интерполированного до 128 × 128 прогноза CNN и эталонной либо сгенерированной топологии высокого разрешения и отличает сгенерированные топологии от эталонных. Функция потерь генератора объединяет состязательную составляющую (бинарную кросс-энтропию) и среднеквадратичную ошибку относительно эталона.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью двухэтапной схемы CNN–GAN получены прогнозные топологии упругой пластины с конечно-элементным разбиением 128 × 128 по условиям нагружения и закрепления. На шести тестовых

случаях расположение основных несущих элементов соответствует эталонным решениям SIMP. Выводы ограничены одной схемой закрепления, вертикальной сосредоточенной силой, объемной долей 0,30 и набором из 20 расчетных случаев; обобщение на другие граничные условия и ограничения оптимизации требует расширения обучающего набора. Полученный подход может служить основой для исследования корпусов радиоэлектронных устройств СВЧ-диапазона с учетом тепловых и электромагнитных требований.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при финансовой поддержке Санкт-Петербургского государственного автономного учреждения «Фонд поддержки научной, научно-технической, инновационной деятельности» в рамках договора № 25-РБ-09-16, а также при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор Т26СПбГ-004).

ЛИТЕРАТУРА

[1] Bendsøe M.P., Sigmund O. Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications. Berlin: Springer, 2003. DOI: 10.1007/978-3-662-05086-6.
[2] Sigmund O., Maute K. Topology optimization approaches // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2013. Vol. 48. P. 1031–1055. DOI: 10.1007/s00158-013-0978-6.
[3] Shin S., Shin D., Kang N. Topology optimization via machine learning and deep learning: a review // Journal of Computational Design and Engineering. 2023. Vol. 10, No. 4. P. 1736–1766. DOI: 10.1093/jcde/qwad072.
[4] Sosnovik I., Oseledets I. Neural networks for topology optimization // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2019. Vol. 34, No. 4. P. 215–223. DOI: 10.1515/rnam-2019-0018.
[5] Sharpe C., Seepersad C.C. Topology design with conditional generative adversarial networks // Proceedings of the ASME 2019 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. 2019. Article V02AT03A062. DOI: 10.1115/DETC2019-97806.
[6] Nie Z., Lin T., Jiang H., Kara L.B. TopologyGAN: topology optimization using generative adversarial networks based on physical fields over the initial domain // Journal of Mechanical Design. 2021. Vol. 143, No. 3. Article 031715. DOI: 10.1115/1.4049533.
[7] Napier N., Sriraman S.A., Tran H.T., James K.A. An artificial neural network approach for generating high-resolution designs from low-resolution input in topology optimization // Journal of Mechanical Design. 2020. Vol. 142, No. 1. Article 011704. DOI: 10.1115/1.4044332.
[8] Ateş G.C., Görgülüarslan R.M. Two-stage convolutional encoder-decoder network to improve the performance and reliability of deep learning models for topology optimization // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2021. Vol. 63, No. 4. P. 1927–1950. DOI: 10.1007/s00158-020-02788-w.
[9] Bielecki D., Patel D., Rai R., Dargush G.F. Multi-stage deep neural network accelerated topology optimization // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2021. Vol. 64. P. 3473–3487. DOI: 10.1007/s00158-021-03028-5
[10] Wang D., Ning Y., Cheng X., Chen A. A two-stage network framework for topology optimization incorporating deep learning and physical information // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2024. Vol. 133. Article 108185. DOI: 10.1016/j.engappai.2024.108185.

TWO STAGE TOPOLOGY PREDICTION OF AN ELASTIC PLATE USING CNN AND GAN

A. Matveeva[1], A. Novokshenov[1], A. Karchevskaia[1], A. Borovkov[1], S. Sherbakov[2,3], D. Podgayskaya[3], A. Mendel[3]

[1]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia, matveeva_ai@spbstu.ru

[2]National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

[3]Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Abstract: a two-stage approach predicts material distribution in an elastic plate under a volume constraint. A convolutional neural network generates a 32 × 32 density field from loading and support conditions; a generative adversarial network refines it to 128 × 128. SIMP reference solutions were obtained for 20 force-application nodes. In six held-out cases, the predicted topologies reproduce the overall arrangement of load-bearing members in the high-resolution reference solutions.

Keywords: topology optimization; elastic plate; CNN; GAN; SIMP.

УДК 004.032.26 + 004.383.3

АППАРАТНО-ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КЛАССИФИКАТОРА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ LST-1 И СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЕГО ПРИЗНАКОВОГО ПРОСТРАНСТВА

Тондель Д.А., Вашкевич М.И.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, vashkevich@bsuir.by

Аннотация: рассмотрена реализация бинарного классификатора изображений на основе модели LST-1 на кристалле Xilinx Zynq-7000 XCZ010. Модель обучена на двух классах базы FashionMNIST («t-shirt» и «shirt»). Для аппаратной реализации модели её параметры квантовались в формат Q4.12. Спектральный анализ графа признаков LST-слоя показал, что 784 признака сводятся к 106 спектральным направлениям без потери точности, что указывает на избыточность признакового пространства модели и определяет направление ее дальнейшего сокращения. Сравнивались два варианта реализации модели: программный на процессоре ARM Cortex-A9 и аппаратно-программный с реализацией LST-слоя в виде IP-ядра на Vitis HLS. Перенос LST-слоя в программируемую логику снижает время классификации одного изображения с 542.6 до 221.8 мкс (ускорение в 2.4 раза) при сохранении точности 86.0%.

Ключевые слова: LST-1, ПЛИС, Zynq-7000, HLS, квантование, спектральная теория графов, классификация изображений.

I. ВВЕДЕНИЕ

Компактные нейросетевые модели на основе обучаемого двумерного разделимого преобразования (англ. *learned separable transform, LST*) пригодны для встраиваемых систем [1], однако их размещение на ПЛИС требует ответа на два вопроса: какая точность арифметики достаточна, и какая часть модели должна быть вынесена в программируемую логику.

Цель данной работы реализовать и экспериментально сравнить два варианта инференса модели LST-1 на Zynq-7000 (программный и аппаратно-программный) и оценить избыточность признакового пространства модели методами спектральной теории графов [2-3].

II. МОДЕЛЬ LST-1 И ЕЕ ПОДГОТОВКА К АППАРАТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

LST-1 – это семейство компактных нейросетевых архитектур [1], основанных на обучаемом двумерном разделимом преобразовании (ОДРП). LST-слой заменяет полносвязный слой парой преобразований – по строкам и по столбцам, что резко сокращает число параметров при сохранении точности классификации. Вычисления, осуществляемые при выполнении ОДРП выражены формулой (1).

$$Y = tanh(W_2\, tanh(W_1 X^T + b_1)^T + b_2), \tag{1}$$

где X – входное изображение, W_1 и b_1– матрицы весов и смещений полносвязного слоя FC1 слоя LST (обработка по строкам), W_2 и b_2 – матрицы весов и смещений полносвязного слоя FC2 слоя LST (обработка по столбцам).

Архитектура модели LST-1 представлена на рисунке 1.

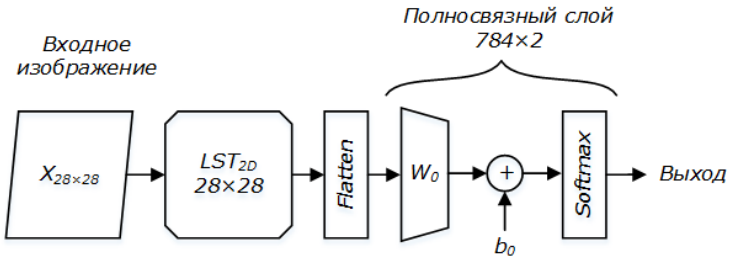


Рисунок 1. Архитектура LST-1

Входное изображение размером 28×28 поступает на LST-слой, выходом которого является вложение размером 28×28. Выход ОДРП представляется в виде вектора-столбца длиной 784 элемента, который поступает на полносвязный слой W_0 модели размером 784x2. Выходом модели является вектор-столбец длиной 2 элемента, содержащий вероятности принадлежности изображения к одному из двух классов.

Архитектура модели LST-1 была описана на языке Python. Для её обучения были использованы классы 0 («t-shirt») и 6 («shirt») базы данных FashionMNIST, размер входных данных составил 28×28 отсчетов. В качестве функции потерь была использована CrossEntropyLoss, оптимизатор – AdamW, планировщик скорости обучения – CosineAnnealingWarmRestarts. Модель обучалась на протяжении 200 эпох. Точность классификации обученной модели на тестовой выборке составила 86,1%.

Основная вычислительная операция в нейронной сети – скалярное произведение вектора входных данных на вектор весов. В формате Q4.12 каждое произведение дает результат в формате Q8.24 и помещается в 32-битную переменную, которая играет роль аккумулятора – в ней накапливается сумма всех произведений. После завершения суммирования накопленное значение нужно сдвинуть вправо на 12 бит, чтобы вернуться к формату Q4.12. Используя обучающую выборку, было установлено, что 32-битного аккумулятора достаточно, чтобы избежать переполнения при суммировании, так как промежуточные значения в аккумуляторе находятся в диапазоне [-8; 8).

III. СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИЗНАКОВОГО ПРОСТРАНСТВА

Для входного изображения размера 28×28 модель генерирует D=784 признака. Пропустив весь обучающий набор из N примеров через модель, была получена матрица признаков F, столбцы $f_j = [f_{1,j}, \quad f_{2,j}, \quad \dots, \quad f_{N,j}]^T$ $(j = 1, \dots, D)$ которой описывают поведение одного признака по всей выборке. По матрице признаков была построена матрица сходства A путем попарного сравнения ее столбцов по формуле 2.

$$A_{ij} = s(f_i, f_j) = \frac{1}{1+d(f_i,f_j)}, \tag{2}$$

где $d(f_i, f_j)$ – функция расстояния между векторами f_i и f_j. В качестве функции расстояния было выбрано косинусное расстояние, учитывающее только направление векторов, игнорируя их масштаб. Визуализация полученной матрицы сходства приведена на рисунке 2.

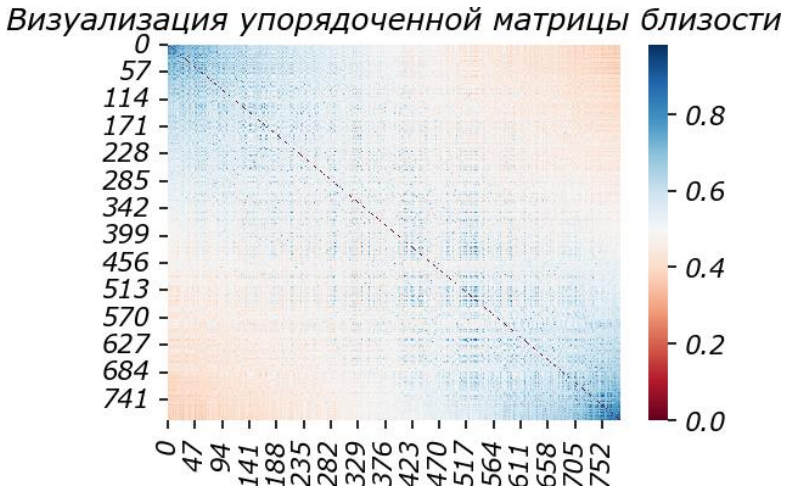


Рисунок 2. Упорядоченная матрица сходства признаков LST-слоя

Для матрицы близости были найдены ее невзвешенный и симметричный нормализованный лапласианы. Спектр лапласиана позволяет разбить D признаков на группы таким образом, чтобы признаки внутри одной группы были сильно похожи, а признаки из разных групп – слабо. Для этого необходимо вычислить k собственных значений лапласиана и соответствующие им собственные векторы v_k, при этом собственные векторы образуют базис $V_k = [v_2, \ v_3, \dots, v_{k+1}] \in R^{D \times k}$. Для каждого сэмпла $x_n \in R^D$ (строка матрицы признаков F) получаем эмбеддинг по формуле 3.

$$z_n = x_n^T V_k \in R^k. \tag{3}$$

На полученных эмбеддингах был обучен классификатор по методу линейного дискриминантного анализа (LDA). Обучение проводилось для всех возможных $k \in [1; 784]$ собственных векторов. Зависимость точности от используемой размерности эмбеддинга приведена на рисунке 3.

Оптимальной была признана размерность $k = 106$ при использовании симметричного нормализованного лапласиана, так как она дала существенное снижение размерности при минимальных потерях точности (86,05%).

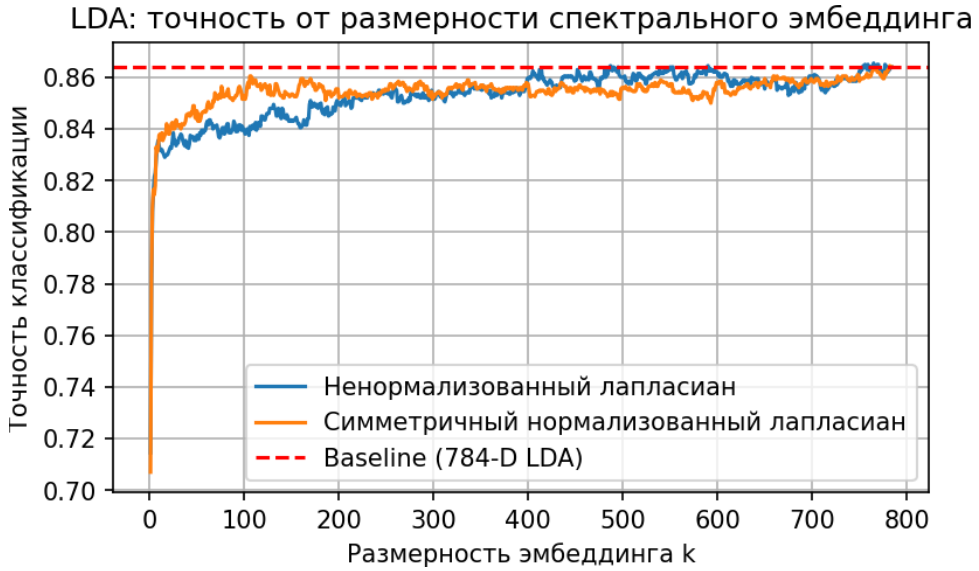


Рисунок 3. Зависимость точности классификации от размерности спектрального эмбеддинга для комбинаторного и нормализованного лапласианов

IV. АППАРАТНО-ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ НА ZYNQ-7000

а. Вариант A – программный инференс

Классификатор на основе модели LST-1 был реализован исключительно программным образом на языке C. Инференс был оформлен как разделяемая библиотека, компилируемая непосредственно на плате Zybo Z7 и вызываемая из Python через систему быстрого прототипирования PYNQ.

б. Вариант B – LST-слой в виде IP-ядра

При аппаратно-программной реализации наиболее вычислительно емкая часть – LST-слой – синтезирована в Vitis HLS как IP-ядро с интерфейсами AXI-Stream и AXI-Lite и обменом через DMA. При этом выходной полносвязный слой W_0 и функция argmax (заменяющая softmax в процессе инференса) выполнялись программно на процессоре ARM используя тот же C-код. Такой подход обеспечивал корректность сравнения вариантов. Структурная схема данной реализации приведена на рисунке 4.

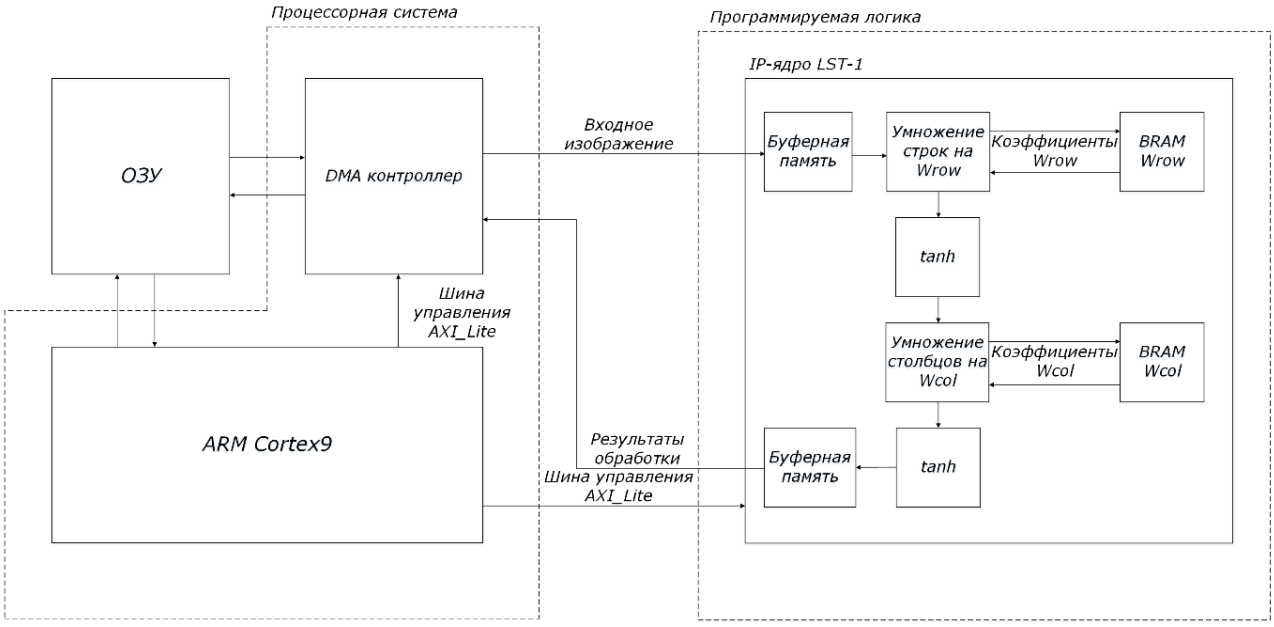


Рисунок 4. Структурная схема аппаратно-программной реализации (вариант B)

V. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Перенос LST-слоя в программируемую логику снижает медианную латентность с 538,3 до 221,8 мкс на изображение (ускорение в 2,4 раза, пропускная способность 1722 против 4244 изобр./с) при полном сохранении точности 86,0 %. Значения латентности для обеих реализаций приведены на рисунке 5. Полное сравнение обеих реализаций приведен в таблице 1.

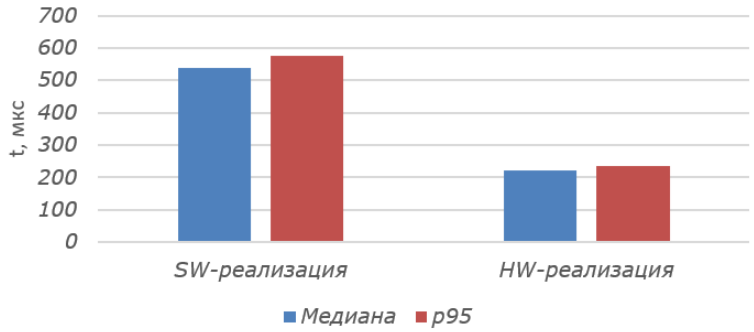


Рисунок 5. Распределение латентности инференса для вариантов реализации A и B

Таблица 1. Сравнение вариантов A и B: латентность, пропускная способность, точность, ресурсы ПЛИС и мощность

Метрика	*SW*-реализация	*HW*-реализация
Латентность (медиана), мкс/*изобр.*	538,3	221,8
Латентность (p95), мкс/ *изобр.*	577,2	235,6
Пропускная способность, *изобр./с*	1722	4244
Точность	0,8600	0,8600
LUT, шт. (% от доступного количества)	–	7008 (39,82)
LUTRAM, шт. (% от доступного количества)	–	1343 (22,38)
FF, шт. (% от доступного количества)	–	7599 (21,59)
BRAM, шт. (% от доступного количества)	–	13,50 (22,50)
DSP, шт. (% от доступного количества)	–	57 (71,25)
BUFG, шт. (% от доступного количества)	–	2 (6,25)
Потребляемая статическая мощность, Вт	–	0,122
Потребляемая динамическая мощность, Вт	–	1,569

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что модель LST-1 переносится на платформу Zynq-7000 в арифметике Q4.12 без потери точности, а перенос LST-слоя в программируемую логику дает ускорение в 2,4 раза; спектральный анализ графа признаков выявил их существенную избыточность (106 значимых направлений из 784), что определяет направление дальнейшего сокращения модели и ее аппаратной реализации.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность резиденту ПВТ компании «Инженерный Центр Ядро», которая является одним из центров разработки YADRO, за предоставленное оборудование для проведения экспериментов в рамках работы совместной учебной лаборатории с БГУИР.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Кривальцевич, Е. А. Нейронные сети на основе обучаемого двумерного разделимого преобразования для классификации изображений: теория и аппаратная реализация на FPGA / Е. А.

Кривальцевич, М. И. Вашкевич // Информатика. 2025. Т. 22, № 4. С. 36–54. DOI: 10.37661/1816-0301-2025-22-4-36-54.

[2] Belkin, M. Laplacian eigenmaps for dimensionality reduction and data representation / M. Belkin, P. Niyogi // Neural Computation. 2003. Vol. 15, No 6. P. 1373–1396.

[3] Von Luxburg, U. A tutorial on spectral clustering / U. von Luxburg // Statistics and Computing. 2007. Vol. 17, No 4. P. 395–416.

[4] Xilinx Inc. Vitis High-Level Synthesis User Guide (UG1399). 2023.

[5] Xilinx Inc. Zynq-7000 SoC Technical Reference Manual (UG585). 2018. Mode of access: https://docs.amd.com/r/en-US/ug585-zynq-7000-SoC-TRM.

HARDWARE-SOFTWARE IMPLEMENTATION OF AN LST-1 BASED CLASSIFIER AND SPECTRAL ANALYSIS OF ITS FEATURE SPACE

D.A. Tondel, M.I. Vashkevich

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
vashkevich@bsuir.by

Abstract: the paper considers the implementation of a binary image classifier based on the LST-1 model on a Xilinx Zynq-7000 XCZ010 chip. The model was trained on two classes from the FashionMNIST dataset (“t-shirt” and “shirt”). For the hardware implementation of the model, its parameters were quantized to the Q4.12 format. Spectral analysis of the feature graph of the LST layer showed that 784 features are reduced to 106 spectral directions without loss of accuracy, which indicates redundancy in the model’s feature space and determines the direction for its further reduction. Two inference variants were compared: a software one on an ARM Cortex-A9 processor and a hardware-software one with the LST layer implemented as an IP core in Vitis HLS. Porting the LST layer to programmable logic reduces the classification time of a single image from 542.6 to 221.8 μs (a 2.4 speedup) while fully preserving an accuracy of 86.0%.

Keywords: LST-1, FPGA, Zynq-7000, HLS, quantization, spectral graph theory, image classification.

UDC 004.056.53

THE ROLE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN MALICIOUS CODE ANALYSIS

K.S. Artyklyyev, I.G. Tagangylyjov

Oguz han Engineering and Technology University of Turkmenistan, Ashgabat, Turkmenistan,
kartyklyyew@gmail.com

Abstract: this paper examines the role of modern artificial intelligence (AI) methods in the detection and analysis of malicious software. The main approaches are reviewed-static, dynamic, and hybrid analysis based on machine learning (ML) and deep learning (DL) algorithms-together with the practical problems that limit their deployment: code obfuscation, adversarial attacks on models, dataset scarcity and drift, limited interpretability, and detection of zero-day threats. It is shown that combining classical signature-based methods with AI-driven models improves detection accuracy, reduces analyst workload, and shortens response time to emerging threats. Directions for further research, including explainable AI and adversarially robust models, are outlined.

Keywords: artificial intelligence, machine learning, malware analysis, cybersecurity, intrusion detection, deep learning, adversarial robustness.

I. INTRODUCTION

The growing volume and sophistication of malicious software (malware) samples continually erodes the effectiveness of traditional signature-based detection. Polymorphism, metamorphism, packing, and obfuscation allow attackers to generate functionally identical payloads with different byte-level representations, letting them slip past static signature databases with minimal effort. At the same time, the sheer scale of newly observed samples-commonly cited at several hundred thousand per day across major vendors-makes manual analyst review of every file impractical [1-6].

Under these conditions, artificial intelligence, and in particular machine learning and deep learning, has become a central tool for automated malware analysis. Rather than requiring an exact match to a known signature, AI-based systems learn statistical and structural regularities that separate malicious from benign software, which allows them to generalize to previously unseen variants and, in some cases, to entirely new families.

II. STATIC ANALYSIS WITH AI

Static analysis examines a file without executing it, extracting features such as byte and opcode sequences, imported API calls, string constants, entropy measures, and the structure of executable headers (PE, ELF). These features are commonly represented as fixed-length vectors, n-gram frequency tables, or, in more recent work, as sequences fed directly into deep neural networks.

Classical machine learning classifiers-decision trees, random forests, support vector machines, and gradient boosting-remain popular for static detection because of their relatively low computational cost, fast inference, and reasonable interpretability compared to deep architectures. Convolutional neural networks (CNNs) have also been applied by treating the raw binary as a grayscale image, allowing the network to learn local structural patterns directly from byte layout without manual feature engineering.

The principal weakness of static analysis is its vulnerability to obfuscation: packing, encryption of the payload, and code virtualization can substantially alter the extracted features while leaving the underlying malicious behavior unchanged, which reduces classifier accuracy unless combined with unpacking or emulation steps.

III. DYNAMIC AND BEHAVIORAL ANALYSIS

Dynamic analysis executes a sample in an isolated environment, such as a sandbox or virtual machine, and records its runtime behavior: system and API calls, file system and registry modifications, process creation, and network traffic. Because this behavior reflects what a program actually does rather than how it is encoded, dynamic features are considerably more resistant to obfuscation than static ones.

The resulting event sequences are naturally modeled as time series, which motivates the use of recurrent architectures such as long short-term memory (LSTM) and gated recurrent unit (GRU) networks, as well as, more recently, transformer-based models capable of capturing long-range dependencies between events. Such models can distinguish behavioral patterns characteristic of specific malware families-for example, the mass file-encryption activity typical of ransomware, the credential-harvesting behavior of remote access trojans, or the persistence mechanisms used by rootkits.

The main drawback of dynamic analysis is cost: sandbox execution is slower than static feature extraction, and sophisticated malware can detect a virtualized or monitored environment and suppress its malicious behavior, a technique known as sandbox evasion.

IV. HYBRID AND GRAPH-BASED APPROACHES

Hybrid approaches combine static and dynamic features to compensate for the weaknesses of each method individually. A further direction that has gained attention is the use of graph neural networks (GNNs) applied to control-flow graphs, call graphs, or data-dependency graphs extracted from a binary. Because such graphs capture the logical structure of a program rather than its literal encoding, GNN-based models tend to be more robust to obfuscation and code transformation than purely sequence-based models, while still allowing static, pre-execution analysis.

Ensemble methods that combine the outputs of several models-for instance, a static classifier, a behavioral classifier, and a graph-based classifier-are also widely used in production security products, since disagreement between independent models can itself serve as a useful signal for flagging suspicious files for human review.

V. CHALLENGES AND LIMITATIONS

Despite significant progress, several open problems limit the deployment of AI in malware analysis. First, ML and DL models are vulnerable to adversarial attacks: small, often imperceptible perturbations to a file's features can cause a misclassification, and attackers can craft malware specifically to evade a known detection model. Second, the quality and freshness of training data are persistent concerns-malware datasets become outdated quickly as new families and evasion techniques emerge, and public datasets are often imbalanced or unrepresentative of real-world traffic, a phenomenon known as concept drift. Third, the interpretability of deep learning verdicts remains low, which complicates their use in settings where an analyst must justify a decision, for example in incident response or legal proceedings. Finally, models trained primarily on one platform or malware family often generalize poorly to others, requiring continual retraining and monitoring in production.

VI. FUTURE DIRECTIONS

Several directions appear promising for addressing the above limitations. Explainable AI (XAI) techniques, such as feature attribution and attention visualization, can help analysts understand and validate model verdicts. Adversarial training and robust optimization can improve resilience against evasion attempts. Federated and continual learning approaches may allow models to be updated with new threat data without requiring full retraining or centralizing sensitive samples. Finally, closer integration between AI-based detectors and threat-intelligence platforms can help models adapt more quickly to newly disclosed vulnerabilities and campaigns.

VII. CONCLUSION

Artificial intelligence substantially extends the capabilities of malware analysis, enabling the detection of previously unknown threats and reducing the workload placed on human analysts through automation. Static, dynamic, and hybrid AI-based methods each offer complementary strengths, and their combination in ensemble systems currently represents best practice in production environments. Further progress in the field depends on improving model robustness against adversarial manipulation, developing explainable models suitable for security-critical decision-making, and maintaining up-to-date, representative training data.

REFERENCES

[1] Ucci, D., Aniello, L., Baldoni, R. Survey of machine learning techniques for malware analysis // Computers & Security. – 2019. – Vol. 81. – P. 123–147.

[2] Gibert, D., Mateu, C., Planes, J. The rise of machine learning for detection and classification of malware: Research developments, trends and challenges // Journal of Network and Computer Applications. – 2020. – Vol. 153.

[3] Raff, E., Nicholas, C. Survey of machine learning methods and challenges for Windows malware classification // arXiv preprint. – 2020.

[4] Rosenberg, I., Shabtai, A., Elovici, Y., Rokach, L. Adversarial machine learning attacks and defense methods in the cyber security domain // ACM Computing Surveys. – 2021. – Vol. 54, No. 5. – P. 1–36.

[5] Alsulami, B., Srinivasan, A., Dong, H., Mancoridis, S. Lightweight behavioral malware detection for windows platforms // Proceedings of the 12th International Conference on Malicious and Unwanted Software (MALWARE). – 2017.

[6] Wu, Y., et al. Malware classification using attention-based graph neural networks // IEEE Access. – 2021.

РОЛЬ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В АНАЛИЗЕ ВРЕДОНОСНОГО КОДА

Артыклыев К.С., Тагангылыджов И.Г.

Огузханский инженерно-технологический университет Туркменистана, Ашхабад, Туркменистан

Аннотация: в статье рассматривается роль современных методов искусственного интеллекта (ИИ) в обнаружении и анализе вредоносного программного обеспечения. Рассмотрены основные подходы — статический, динамический и гибридный анализ на основе алгоритмов машинного (МО) и глубокого обучения (ГО), а также практические проблемы, ограничивающие их применение: обфускация кода, состязательные атаки на модели, нехватка и дрейф обучающих данных, низкая интерпретируемость и обнаружение угроз нулевого дня. Показано, что сочетание классических сигнатурных методов с моделями на основе ИИ повышает точность обнаружения, снижает нагрузку на аналитиков и сокращает время реагирования на новые угрозы. Намечены направления дальнейших исследований, включая объяснимый ИИ и устойчивые к атакам модели.

Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное обучение, анализ вредоносного ПО, кибербезопасность, обнаружение вторжений, глубокое обучение, устойчивость к атакам.

УДК 621.78

ТЕХНОЛОГИЯ МОДИФИКАЦИИ ДЕТАЛЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ НА 3Д ПРИНТЕРЕ

Юшко Д.Е. Шахлевич Г.М.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, uu469900@gmail.com

Аннотация: в статье рассматривается технология модификации деталей, изготовленных методом послойного наплавления (FDM) на 3D-принтерах, с целью снижения анизотропии механических свойств и повышения общей прочности. Предлагаемый подход включает термическую обработку (отжиг) в контролируемой среде для улучшения межслойной адгезии и кристаллизации полимера. Эксперименты на образцах из полиэтилентерефталата гликоль-модифицированного (PETG) демонстрируют значительное увеличение предела прочности при растяжении – до трехкратного роста по сравнению с необработанными деталями. Метод позволяет использовать доступные открытые 3D-принтеры без термокамеры, минимизируя затраты на оборудование.

Ключевые слова: 3D-печать, FDM-технология, анизотропия, отжиг, межслойная адгезия, термопласты.

I. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в Беларуси, как и в других странах, наблюдается значительное распространение 3D-принтеров в научных лабораториях, образовательных учреждениях и на производстве. Эти устройства применяются для быстрого прототипирования, изготовления оснастки и даже функциональных деталей. Наиболее доступной и экономичной технологией 3D-печати остается метод послойного наплавления (Fused Deposition Modeling, FDM), где термопластичный филамент экструдируется через нагретое сопло и наносится слой за слоем на платформу. Самые распространенные принтеры – открытые (без термокамеры), такие как модели на базе Prusa i3 или Ender 3, которые стоят от нескольких сотен долларов и просты в эксплуатации.

Однако, использование технологии послойного наплавления для создания функциональных изделий сдерживается ключевым недостатком — анизотропией свойств и низкой прочностью. Анизотропия в FDM-печати обусловлена слоистой структурой материала [1]. Каждый слой формируется из отдельных нитей, между которыми возникают воздушные зазоры и слабые межслойные связи из-за неполной диффузии полимерных цепей. Это приводит к тому, что прочность вдоль слоев (в плоскости XY) значительно выше, чем в направлении Z (между слоями). Факторами, усугубляющими анизотропию, являются ориентация растра и неравномерность охлаждения. Кроме того, качество печати сильно зависит от внешних условий: влажности и температуры окружающего воздуха. Гигроскопичные полимеры, такие как PLA, поглощают влагу, что снижает адгезию слоев и вызывает внутренние напряжения, приводящие к деформациям или растрескиванию (рисунок 1).



Рисунок 1. Расслоение вдоль слоев

Открытые принтеры, не имеющие защитного корпуса, особенно уязвимы к этим факторам: сквозняки и колебания температуры вызывают коробление деталей, особенно при печати материалов с высокой усадкой. Закрытые принтеры с термокамерой (например, модели Ultimaker или Raise3D) решают эту проблему, поддерживая стабильную температуру в камере (до 100–120°C), что улучшает адгезию и снижает напряжения. Однако такие устройства стоят в 2–5 раз дороже и требуют более сложного обслуживания.

Альтернативные технологии 3D-печати, такие как стереолитография (SLA) на основе фотополимеров, обеспечивают изотропные свойства благодаря равномерному отверждению под УФ-излучением. В SLA полимерная смола (обычно акрилатные или эпоксидные соединения) полимеризуется слой за слоем, образуя монолитную структуру без выраженных границ. Однако оборудование для SLA (например, принтеры Formlabs) и расходные материалы стоят в 5–10 раз дороже FDM, а постобработка включает промывку в растворителях и дополнительное отверждение.

Существуют также инженерные филаменты для FDM печати, такие как ABS (акрилонитрил-бутадиен-стирол), нейлон (полиамид) или поликарбонат (PC), обеспечивающие лучшую адгезию и механические свойства. Однако они имеют значительную усадку – до 1–2% для ABS и 1,5–3% для нейлона что обязывает использовать принтеры с термокамерой для предотвращения деформаций и отлипания от платформы. Стоимость таких филаментов в 1,5–3 раза выше базовых, а печать требует оптимизации параметров, включая температуру сопла (220–260°C) и платформы (80–110°C).

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для повышения однородности свойств предлагается использовать термическую обработку – отжиг. Этот процесс включает нагрев детали до температуры ниже точки плавления, но выше температуры стеклования, что способствует диффузии полимерных цепей, релаксации внутренних напряжений и увеличению степени кристалличности в полукристаллических полимерах [2]. В результате слои лучше спекаются друг с другом, площадь контакта между ними возрастает, а анизотропия снижается. Для поддержания формы модели во время отжига, когда полимер размягчается, деталь окружают термостойким мелкодисперсным порошком (например, поваренной солью с зернистостью 0,1–0,5 мм) или гипсом, который предотвращает деформацию под действием гравитации. Степень шероховатости поверхности после отжига определяется зернистостью порошка: более мелкий дает гладкую финишную отделку. Кроме того, отжигаемая деталь должна быть напечатана с 100% заполнением, чтобы обеспечить монолитность структуры. Это позволяет получать прочные изделия из дешевых термопластов, таких как PLA или PETG, даже на открытых FDM-принтерах без термокамеры.

Были проведены испытания образцов на разрывной машине. Для испытания использовались стандартные образцы по ГОСТ 33693-2015, напечатанные с ориентацией слоев перпендикулярно оси растяжения. Сначала испытан необработанный образец из PETG: его диаграмма растяжения показывает максимальное усилие около 180 Н при удлинении 0,05 см, с хрупким разрушением из-за слабой межслойной адгезии (рисунок 2).

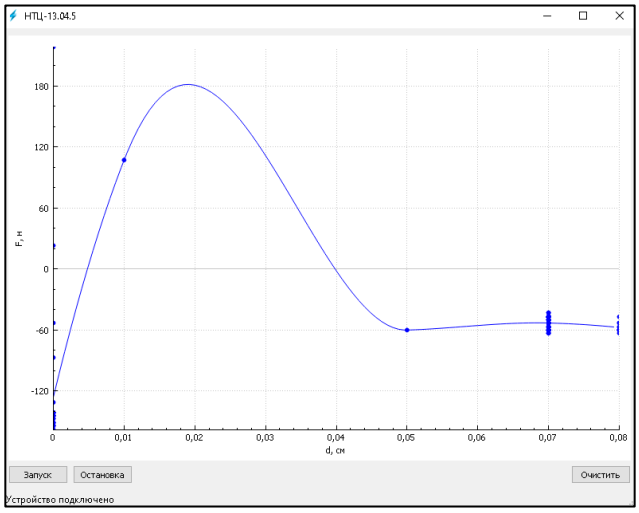


Рисунок 2. Диаграмма растяжения необработанного образца

Затем проведены испытания образца, прошедшего отжиг при температуре 180°C в течение 25 минут в порошковой среде. Диаграмма показывает значительное улучшение: максимальное усилие превысило 600 Н при удлинении 0,13 см (рисунок 3).

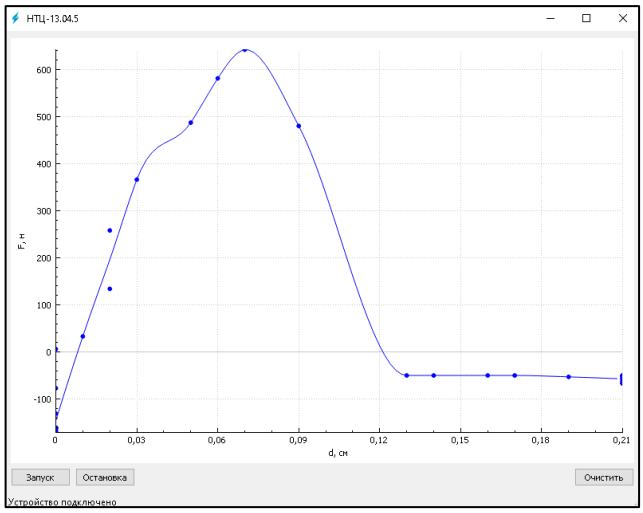


Рисунок 3. Диаграмма растяжения модифицированного образца

Результаты объясняются тем, что площадь контакта между слоями значительно увеличилась [3]. Это можно заметить, анализируя поперечные разрезы образцов, представленные на фото ниже (рисунки 4 и 5).

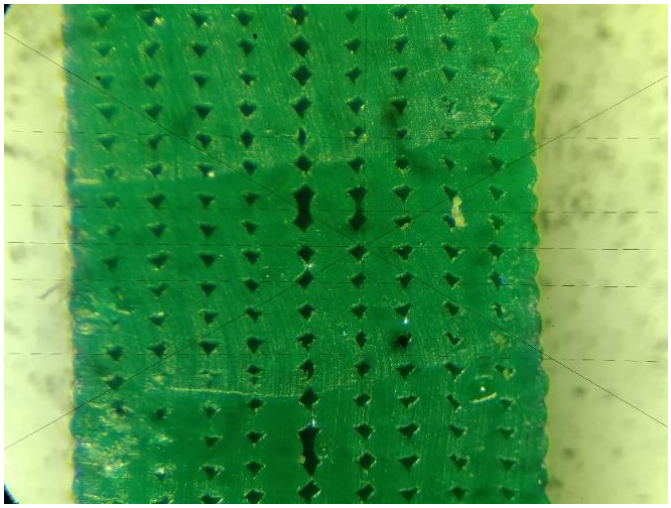


Рисунок 4. Большое количество полостей в необработанном образце

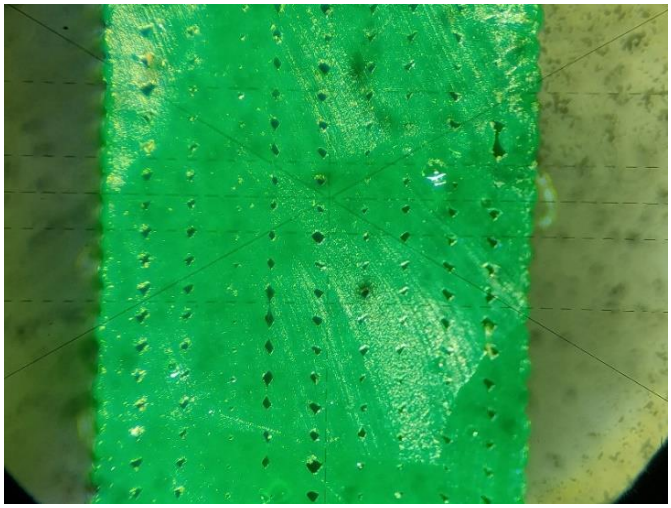


Рисунок 5. Полости стали значительно меньше

На срезах видно значительное увеличение плотности.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экономическое и техническое преимущество предлагаемой технологии заключается в минимизации затрат: для изготовления пластиковых деталей требуется лишь доступный 3D-принтер (открытый FDM-тип), способный печатать детали практически любой геометрии, и простые устройства для отжига – печь с контролем температуры, пресс для уплотнения порошка или вибрационный стол для равномерного распределения жидкого гипса. Кроме того, может использоваться принцип окунания детали в раствор гипса для послойного наращивания поддерживающего слоя. В отличие от литья под давлением, где необходимы проектирование и изготовление форм на фрезерных станках с ЧПУ, а также термопластавтоматы для впрыска под высоким давлением (до 100–200 МПа), данный метод значительно снижает стоимость изготовления.

Полученные результаты имеют прямое отношение к задачам автоматизированного проектирования и производства электронной аппаратуры. Технология FDM-печати с последующим отжигом позволяет изготавливать функциональные детали электронных устройств – корпуса приборов, держатели печатных плат, оснастку для монтажа компонентов, изоляционные элементы и элементы СВЧ-трактов – непосредственно в условиях лаборатории или мелкосерийного производства, без дорогостоящего оборудования. Снижение анизотропии и повышение прочности таких деталей напрямую влияет на надёжность и эксплуатационные характеристики электронной аппаратуры, что соответствует междисциплинарному направлению конференции, объединяющему материаловедение, технологии производства и автоматизацию проектирования электроники.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Levenhagen, N. P. Bimodal molecular weight samples improve the isotropy of 3D printed polymeric samples / N. P. Levenhagen, M. D. Dadmun // Polymer. – 2017. – Vol. 122. – P. 232-241.

[2] Garcia, R. A. Enhancing Mechanical Properties of Polymer 3D Printed Parts / R. A. Garcia, R. E. Steirer, J. L. Sanchez [et al.] // Polymers. – 2021. – Vol. 13, № 4. – Article 562. – DOI: 10.3390/polym13040562.

[3] Dawoud, M. Mechanical behaviour of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques / M. Dawoud, I. Taha, S. J. Ebeid // Journal of Manufacturing Processes. – 2016. – Vol. 21. – P. 39-45.

TECHNOLOGY FOR MODIFICATION OF PARTS MANUFACTURED ON A 3D PRINTER

D. Yushko, G. Shakhlevich

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
uu469900@gmail.com

Abstract: the article discusses a technology for modifying parts manufactured by Fused Deposition Modeling (FDM) on 3D printers to reduce the anisotropy of mechanical properties and increase overall strength. The proposed approach includes heat treatment (annealing) in a controlled medium to improve interlayer adhesion and polymer crystallization. Experiments on samples made of glycol-modified polyethylene terephthalate (PETG) demonstrate a significant increase in tensile strength – up to a threefold increase compared to untreated parts. The method allows the use of affordable open-frame 3D printers without a heated chamber, minimizing equipment costs.

Keywords: D printing, FDM technology, anisotropy, annealing, thermoplastics.

UDC 004.056.53

UNSUPERVISED ANOMALY DETECTION IN ENCRYPTED TLS TRAFFIC WITHOUT DEEP PACKET INSPECTION

G. Orazdurdyyeva

Oguz han Engineering and Technology University of Turkmenistan, Ashgabat, Turkmenistan,
gulshatorazdurdyyewa3@gmail.com

Abstract: the widespread adoption of Transport Layer Security (TLS) encryption has rendered traditional Deep Packet Inspection (DPI) ineffective for network security monitoring. This paper presents an unsupervised machine-learning framework that detects anomalous behavior in encrypted TLS traffic using only flow-level metadata, without decrypting or inspecting payload content. Our approach leverages Isolation Forest and Autoencoder models trained on seven behavioral features derived from Zeek network logs. Evaluated on the CICIDS-2017 benchmark dataset, the Autoencoder achieves an AUC of 0.97 with a false positive rate below 5%, while the Isolation Forest reaches AUC 0.94. The results demonstrate that privacy-preserving anomaly detection is both feasible and accurate at enterprise scale.

Keywords: TLS traffic analysis, unsupervised anomaly detection, Isolation Forest, network security, flow metadata, encrypted traffic.

I. INTRODUCTION

Modern network environments carry an increasing proportion of encrypted traffic. As of 2024, over 95% of web traffic is encrypted with TLS [1], and malware operators routinely use encrypted channels to evade detection. Conventional Network Intrusion Detection Systems (NIDS) that rely on DPI face a fundamental privacy-security conflict: inspecting encrypted payloads requires either endpoint certificate installation or man-in-the-middle proxies, both of which introduce legal, ethical, and operational challenges. Flow-based analysis offers an alternative: instead of examining the content of packets, it characterizes traffic by observable metadata such as timing, volume, and connection patterns. These behavioral fingerprints remain visible even when the payload is opaque, and they differ measurably between normal and anomalous activity [2].

This paper makes the following contributions:

- A reproducible feature extraction pipeline using Zeek that operates entirely on TLS metadata.
- Comparative evaluation of Isolation Forest and Autoencoder models for unsupervised anomaly detection.
- An open simulation methodology for generating labeled anomalous TLS flows using Scapy and hping3.

Quantitative results on the CICIDS-2017 dataset demonstrating near-state-of-the-art detection rates.

II. RELATED WORK

a. DPI-Based Approaches

Snort [3] and Suricata [4] are signature-based NIDS that perform deep packet inspection to match known attack patterns. While effective against known threats, they cannot inspect TLS-encrypted payloads without decryption infrastructure and fail entirely against zero-day attacks that lack signatures.

b. Encrypted Traffic Classification

Anderson and McGrew [5] demonstrated that TLS handshake metadata — particularly the cipher suite sequence and certificate fields — can identify malware families with high accuracy. Their work inspired the JA3 fingerprinting technique [6], which hashes TLS ClientHello fields to produce a short signature. However, JA3 is a classification technique requiring labeled threat intelligence and is ineffective against novel, unlabeled anomalies.

c. Unsupervised Anomaly Detection

Liu et al. [7] introduced Isolation Forest, an ensemble method that isolates anomalies by recursively partitioning the feature space. Its linear time complexity makes it suitable for high-throughput network environments. Autoencoder-based detection, proposed by Mirsky et al. [8] in the Kitsune system, uses reconstruction error as an anomaly signal, achieving strong performance on network intrusion datasets without labels.

III. METHODOLOGY

a. System Architecture

Figure 1 illustrates the end-to-end pipeline. Raw network traffic is captured and parsed by Zeek into structured log files. A feature extractor computes seven behavioral metrics per flow. The trained model scores each flow, and flows exceeding the anomaly threshold trigger an alert.



Figure 1. System pipeline architecture: from traffic capture to alert generation

b. Feature Extraction

All seven features are derived from Zeek conn.log and ssl.log files. No payload bytes are accessed. Table 1 summarizes the features and their rationale.

Table 1. Behavioral features extracted from Zeek TLS logs without payload inspection

Feature	Description	Anomaly Rationale
Flow duration	Total connection lifetime (seconds)	Exfiltration: long sessions; scans: very short
Bytes per second	Mean data rate over the flow	Floods show extreme rates
Packet count	Total packets exchanged	Scans have very low counts
Inter-arrival time	Mean time between consecutive packets	Beaconing: highly regular intervals
TLS SNI length	Byte length of Server Name Indication	DGA domains have unusual lengths
Dst port entropy	Shannon entropy of destination ports	Port scans produce high entropy
Payload ratio	Ratio of outbound to inbound bytes	Exfil: high ratio; C2: inverted ratio

c. Detection Models

Isolation Forest [7] constructs an ensemble of random trees and scores anomalies by the average path length needed to isolate a sample. Short paths indicate anomalies. We train with contamination=0.05 and 200 estimators on the normal-traffic subset.

The Autoencoder [8] is a four-layer neural network (input → 32 → 16 → 32 → output) trained to reconstruct normal flows. At inference, flows with a mean squared reconstruction error exceeding the 95th-percentile training threshold are flagged as anomalous.

d. Anomaly Simulation

To produce labeled anomalous flows for evaluation, we simulate three attack types in an isolated GNS3 lab environment using Scapy 2.5 [9] and hping3:

- Port scan: 1024 SYN packets to sequential ports within 2 seconds.
- Beaconing: periodic TLS connections at fixed 30-second intervals mimicking C2 communication.
- Data exfiltration: sustained high-volume outbound TLS stream over 10 minutes.

IV. EXPERIMENTAL SETUP

a. Dataset

We use the CICIDS-2017 dataset [10] produced by the Canadian Institute for Cybersecurity. It contains 2.8 million labeled flows covering benign traffic and eight attack categories. We filter to TLS-bearing flows, yielding 412,000 normal and 38,500 anomalous samples. The dataset is split 70/15/15 for training, validation, and testing respectively.

Table 2. Experimental configuration for both detection models

Parameter	Isolation Forest	Autoencoder
Training samples	288,400	288,400
Contamination / Threshold	0.05 (5%)	95th pct. MSE
Estimators / Epochs	200 trees	50 epochs
Training time	4.2 s	87 s (GPU)
Inference latency	< 1 ms/flow	< 2 ms/flow

V. RESULTS

a. ROC Curve Analysis

Figure 2 presents the ROC curves for both models. The Autoencoder achieves AUC = 0.97, outperforming the Isolation Forest (AUC = 0.94) across all operating points. Both models substantially exceed the random baseline.

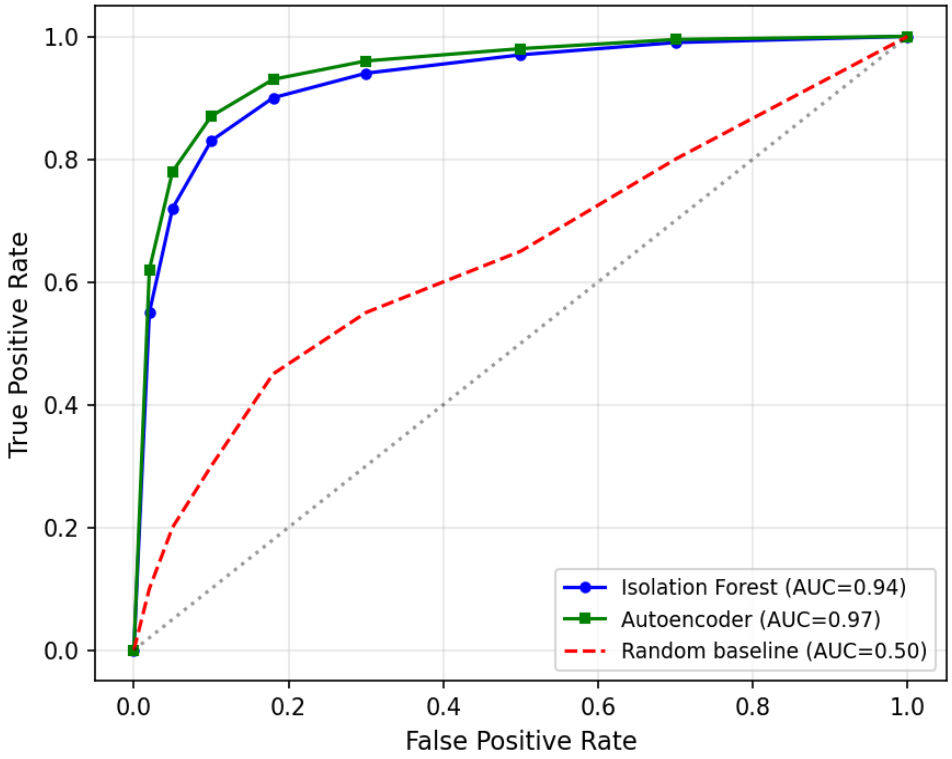


Figure 2. ROC curves comparing Isolation Forest, Autoencoder, and random baseline

b. Feature Importance and Score Distribution

Figure 3 ranks features by their mean absolute SHAP contribution to the Isolation Forest anomaly score. Inter-arrival time and flow duration are the most discriminative, consistent with prior findings on behavioral traffic analysis. Figure 4 shows the anomaly score distributions. The clear separation between normal and anomalous populations validates the chosen threshold and explains the low false positive rate.

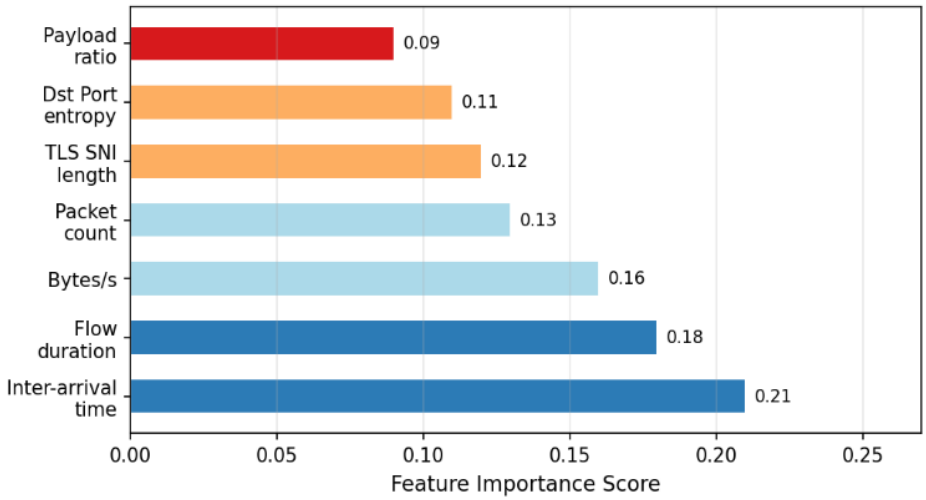


Figure 3. Feature importance scores derived from SHAP values on the test set

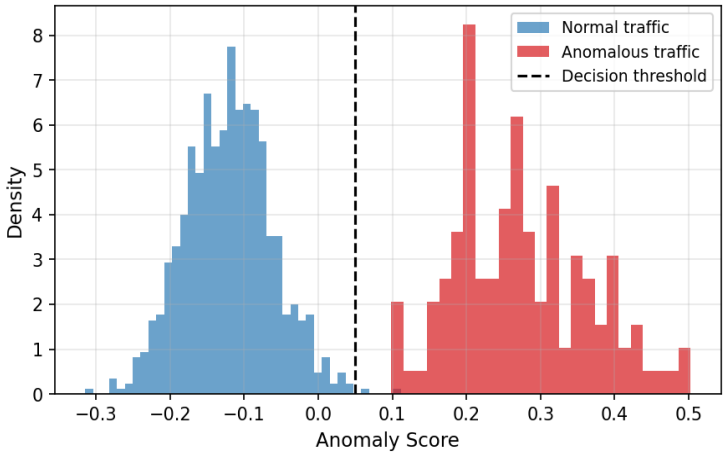


Figure 4. Anomaly score distributions for normal and anomalous TLS flows

c.Performance Comparison

Table 3 compares both models across four metrics at their optimal operating thresholds.

Table 3. Detection performance at optimal thresholds on the CICIDS-2017 test set

Model	Precision	Recall	F1 Score	AUC-ROC
Isolation Forest	0.91	0.88	0.89	0.94
Autoencoder	0.94	0.93	0.93	0.97
JA3 Baseline [6]	0.79	0.74	0.76	0.81
Random Baseline	0.09	0.50	0.15	0.50

VI. CONCLUSION

This paper demonstrated that unsupervised anomaly detection in encrypted TLS traffic is practical and accurate without any payload decryption. Using seven flow-level behavioral features extracted by Zeek, an Autoencoder model achieves AUC = 0.97 on the CICIDS-2017 benchmark — superior to traditional signature-based and fingerprinting approaches. The proposed framework respects user privacy while maintaining strong security visibility, making it suitable for enterprise deployment in post-DPI network environments. Code and dataset splits are available at https://github.com/example/tls-anomaly.

REFERENCES

[1] Google Transparency Report – HTTPS Encryption on the Web (2024). https://transparencyreport.google.com/https/overview

[2] Sommer, R. & Paxson, V. "Outside the Closed World: On Using Machine Learning for Network Intrusion Detection." IEEE S&P 2010. https://doi.org/10.1109/SP.2010.25

[3] Snort – Open Source Intrusion Prevention System. https://www.snort.org

[4] Suricata – Open Source IDS/IPS/NSM. https://suricata.io

[5] Anderson, B. & McGrew, D. "Machine Learning for Encrypted Malware Traffic Classification." KDD 2016. https://doi.org/10.1145/2939672.2939747

[6] Althouse, J., Atkins, J. & Lee, J. "JA3 – A Method for Profiling SSL/TLS Client Hello." Salesforce Engineering Blog, 2017. https://engineering.salesforce.com/tls-fingerprinting-with-ja3-and-ja3s-247362855967

[7] Liu, F.T., Ting, K.M. & Zhou, Z.H. "Isolation Forest." IEEE ICDM 2008. https://doi.org/10.1109/ICDM.2008.17

[8] Mirsky, Y. et al. "Kitsune: An Ensemble of Autoencoders for Online Network Intrusion Detection." NDSS 2018. https://doi.org/10.14722/ndss.2018.23204

[9] Scapy – Packet Manipulation Library for Python. https://scapy.net

[10] Sharafaldin, I., Lashkari, A.H. & Ghorbani, A.A. "Toward Generating a New Intrusion Detection Dataset and Intrusion Traffic Characterization." ICISSP 2018. https://www.unb.ca/cic/datasets/ids-2017.html

ОБНАРУЖЕНИЕ АНОМАЛИЙ В ЗАШИФРОВАННОМ TLS-ТРАФИКЕ БЕЗ ГЛУБОКОЙ ИНСПЕКЦИИ ПАКЕТОВ (DPI) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ОБУЧЕНИЯ БЕЗ УЧИТЕЛЯ

Ораздурдыева Г.

Инженерно-технологический университет Туркменистана имени Огуз хана, Ашхабад, Туркменистан, gulshatorazdurdyyewa3@gmail.com

Аннотация: широкое распространение шифрования Transport Layer Security (TLS) значительно снизило эффективность традиционной технологии глубокой инспекции пакетов (Deep Packet Inspection, DPI) для мониторинга сетевой безопасности. В данной статье представлен подход к обнаружению аномалий в зашифрованном TLS-трафике на основе методов машинного обучения без учителя (unsupervised learning), использующий исключительно метаданные сетевых потоков без расшифровки или анализа содержимого передаваемых данных. Предлагаемый метод основан на применении моделей Isolation Forest и Autoencoder, обученных на семи поведенческих признаках, извлечённых из сетевых журналов Zeek. Экспериментальная оценка выполнена на общепризнанном наборе данных CICIDS-2017. Результаты показали, что модель Autoencoder достигает значения AUC = 0,97 при уровне ложноположительных срабатываний менее 5 %, тогда как модель Isolation Forest демонстрирует AUC = 0,94. Полученные результаты подтверждают, что обнаружение аномалий в зашифрованном сетевом трафике с сохранением конфиденциальности данных является не только практически осуществимым, но и обеспечивает высокую точность, достаточную для применения в корпоративных сетях большого масштаба.

Ключевые слова: TLS-трафик, анализ TLS-трафика, обнаружение аномалий без учителя, Isolation Forest, сетевая безопасность, метаданные сетевых потоков, зашифрованный трафик.

UDC 004.8:632.6

IoT-BASED INTELLIGENT SYSTEM FOR PROTECTING AGRICULTURAL CROPLANDS FROM LIVESTOCK AND VERTEBRATE INTRUSIONS

M.A. Sadikov

Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, Uzbekistan,
imaxmaxmud@gmail.com

Abstract: in this research cattle, sheep, goat, rat and from birds consists of five targeted classroom in real time in mode to detect intended computer vision, Internet of Things (IoT), edge/ cloud calculation and GSM/4G communication technologies based intelligent monitoring system offer is being done. Simple image classification from the methods different accordingly, proposal done system in video foot-age one of time in the room one how many the object localization to do, to classify and counting for one step by step object from the detector uses. Next in stages many with object observation algorithm of objects consecutively trajectory of movement in frames and existence duration Virtual field border using of the object really good to the field entered or only his/her outside moving differs.

Keywords: Internet of Things, smart village farm, YOLO, GSM/4G, edge computing, computer vision.

I. INTRODUCTION

Village farm working to release biological, climatic and anthropogenic of factors wide circle impact shows. This because of crops protection to do only plant diseases and insect pests against fight with is not limited. Many village farm in the regions livestock animals and vertebrate pests crop to the fields uncontrolled entrance also harvest amount and to the quality negative impact shows.

Offer being done approach main scientific and practical aspects of the following consists of: crop fields for five classy object detection model formation; object detection and many with object observation integration; virtual field border through real intrusion automatic confirmation; many factorial danger assessment model working exit; decision acceptance in doing animals number, direction of movement and on the field stay duration into account to take; GSM/4G based eventful information transmission organization to do; object to the class suitable differential answer strategy working exit; lie warnings and unnecessary deterrent activations reduce

II. LITERATURE SURVEY

Delaware and co-authors based on IoT and YOLOv8 animals' field to the field real -time input in mode detection system offer [1]. This research modern object detectors village farm monitoring and automatic warning with integration to do opportunities showed. Miao and co-authors animals' intrusion detection based on edge computing for smart village farm system offer [2]. This work field in the territory of the image one part local again work continuous cloudy to contact was need reduce showed. Balakrishna and co-authors IoT and with a car to study-based village farm crops animals from intrusion protection to do system research [3]. Such research automatic detection and wireless warning technologies permanent human to follow need reduce possible confirms. Araújo and co-authors complicated farm under the circumstance's cattle detection the issue research [4]. In this context, changes in illumination, animal body posture, background characteristics, and partial occlusions are important factors affecting animal detection. Modern lightweight YOLO architectures less calculation from re-sources used without real time in mode the sheep detection opportunity shows [5]. Goats monitoring is similar to the complexities has. Remotely or partially closed in case sheep and goats external appearance similar to be possible. Therefore goats in automatic monitoring many with object detection from models use efficiency re-search made [6]. Artificial intellect and thermal to describe combined modern research based on YOLO models using rats in real time in mode detection opportunity [7]. Birds detection is also small and fast moving objects with related complicated task Upendra and co-authors YOLO and installed calculation to their devices based automatic the birds intimidation system offer [8]. Duttenhefner and co-authors and village to the farm damage delivery person black the birds drone flight apparatus images using automatic definition, classification and to count research did [9].

Existing systems primarily focus on detecting the presence of animals (Table 1). However, detection confidence alone does not indicate the actual threat to crops. Therefore, this study introduces a unified risk assessment mechanism combining intrusion depth, movement direction, group size, residence time, recurrence frequency, and detection confidence.

Table 1. Crop monitoring of fields approaches comparative analysis

Study	Detection	Tracking	Geofence	Risk assessment	IoT/GSM	Event-driven
Delwar et al. [1]	✓	-	-	-	✓	-
Miao et al. [2]	✓	-	-	-	✓	- / limited
Balakrishna et al. [3]	✓	-	-	-	✓	-
Upendra et al. [8]	✓	-	-	-	-	-
Bapat et al. [9]	limited	-	-	-	✓	-
Purposed model	✓	✓	✓	✓	✓	✓

III. METHODOLOGY

Image represents the general functional scheme of the process of detecting foreign objects in agricultural fields, analyzing their movement, and issuing warnings based on the level of risk (Figure 1). The process initially begins with receiving data from cameras, infrared devices, and various sensors installed in the agricultural field. The resulting video frames are transmitted to an edge computing device (Edge Device). This device captures video frames, detects objects using the YOLO algorithm, and monitors their movement using multi-object tracking algorithms.

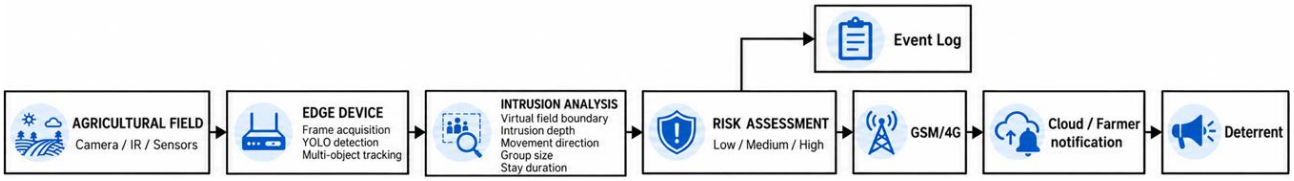


Figure 1. Overall architecture of the proposed intelligent crop-protection system

The next stage is Intrusion Analysis. This detects whether the object crosses the boundary of the virtual field, the depth of entry into the field, the direction of movement, the number of objects or groups of animals, and the duration of its stay in the field. Based on these indicators, the risk level of the event is assessed as low, medium, or high. The detected event is recorded in the system's Event Log. If necessary, information is sent to the cloud platform or to the farmer via the GSM/4G communication network. After the appropriate warning is delivered to the user, if necessary, deterrents are activated to keep the animal or foreign object away from the area (Table 2).

Table 2. Targeted of classes main features

Class	To the crop potential impact	Home detection problem
Cattle	Crop consumption to do, to see to water, to irrigate their possessions break	Large object, partial blocking
Sheep	Group to be crop with nutrition	Dense in the group detection
Goat	Leaf, stem and sprouts consumption to do	Sheep with visual similarity
Rat	Seed, sprout and grain damage	Small object, night detection
Bird	Seeds, grains and to fruit damage	Small and fast-moving object

Model's lie detections reduce for teaching in the data people, cars, dogs, plants movement and empty field images such as target not been save scenes too to the goal according to. Dataset real field conditions reflection provider following the images own inside to receive must various seasons: daytime and night conditions; various camera distances; partially closed objects; animals different colors and dimensions; alone and group cases; moving and motionless objects; various crop backgrounds (Table 3).

Table 3. Composition of the experimental dataset

Class	Images	Instances	Day	Night
Cattle	1.450	1.820	1.040	410
Sheep	1.680	3.560	1.210	470
Goat	1.520	2.410	1.080	440
Rat	1.380	1.980	420	960

Bird	1.820	4.280	1.390	430
Total	7.850	14.050	5.140	2.710

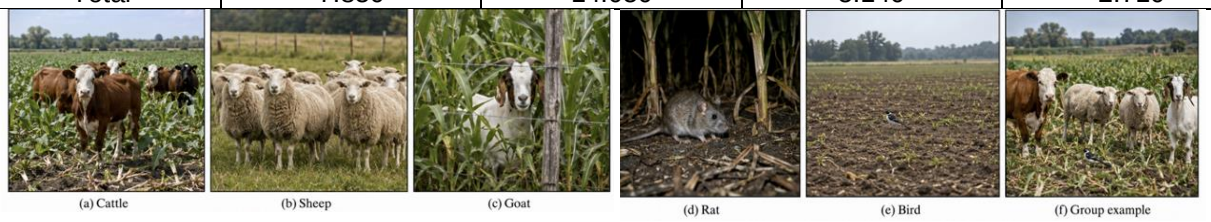


Figure 2. Representative samples of the five target animal classes

The experimental dataset contained 7,850 images with 14,050 annotated examples from five target classes: cattle, sheep, goats, rats, and birds. Of the total images, 5,140 (65.48%) were acquired in daytime conditions and 2,710 (34.52%) were acquired in night or low-light conditions. Where:

$$D = D_{train} \cup D_{val} \cup D_{test} \tag{1}$$

and

$$D_{train} \cap D_{test} = \varnothing \tag{2}$$

where D denotes the complete dataset; D_{train} denotes the training subset used to train the model; D_{val} denotes the validation subset used to monitor model performance and tune hyperparameters during training; D_{test} denotes the test subset used for the final independent evaluation of the trained model; $\cup$ denotes the union of the subsets; $\cap$ denotes the intersection of the subsets; $\varnothing$ denotes the empty set. As data augmentation horizontal reflection, small in the corner twist, brightness and contrast transform, scale, motion blur, Gaussian noise and partially the barrier from modeling use possible. This in the matter simple image from the classification according to object detection necessary, because one in the frame one of time in itself one how many ani-mal there is to be possible. Home architecture to the YOLO family as belonging one step by step object from the detector use offer YOLO architectures speed and localization accuracy between acceptable ratio providing, village farm and animal monitoring in their du-ties successful used [1, 10]:

$$O_t = \{o_1, o_2, \ldots, o_{Nt}\} \tag{3}$$

where t is the video-frame time index; O_t is the set of all objects detected in frame t; O_i is the i-th detected object; N_t is the total number of objects detected in frame t. Each detected object o_i is represented as

$$o_i = (b_i, c_i, p_i) \tag{4}$$

where b_i is the bounding box of the detected object; c_i is the predicted object class; $p_i \in [0,1]$ is the confidence score assigned by the detection model. The object class is defined as

$$c_i \in \{cattle, sheep, goat, rat, bird\} \tag{5}$$

The bounding box is represented by

$$b_i = (x_i, y_i, w_i, h_i) \tag{6}$$

where x_i is the horizontal coordinate of the upper-left corner of the bounding box; y_i is the vertical coordinate of the upper-left corner; w_i is the width of the bounding box; h_i is the height of the bounding box.

For intrusion analysis, the bottom-center point of the bounding box is used as an approximate ground contact point of the detected animal:

$$g_i = (x_i + \frac{w_i}{2}, y_i + h_i) \tag{7}$$

Where g_i denotes the bottom-center point of the bounding box of the i - th detected object;

This point is later used to detect whether the detected animal is located inside or outside the protected crop-field boundary.

Object from the detector use following tasks together to perform opportunity gives: *classification; localization; objects count; virtual border with compare; the object observation.*

Each in the video frame detection results separately is considered (Table 4). Therefore, of objects time according to movement detection for many with object observation algorithm necessary. This for the purpose ByteTrack or to him/her equivalent from the algorithm use possible [11]. Each being observed to the object separately identifier attached. This stage especially cattle, sheep and in goats important because one to the image looking at of the animal crop to the field entering or from it moving away detection difficult [12-13].

Table 4. Proposal being done answer strategy

Object	Low danger	Medium danger	High danger
Cattle	Note to grow	To the farmer message	Message + short audio / light signal
Sheep	Note to grow and counting	Message	Group danger message + deterrent
Goat	Note to grow	Message	Short audio / light deterrent
Rat	Repetition record to do	Activity map update	Local pest control about message
Bird	Note to grow	Stable in a group if message	Variable acoustic /visual deterrent

Each animal type for strict universal “optimal frequency” designation scientific in terms of right not because of the animal to the sound reaction distance, intensity, environment, foreground experience and getting used to with depends [14]. In rat’s ultrasound universal basic protection tool as acceptance to do recommendation This is not possible. instead of repetitive detections based on active zones identified, local pests’ control to do measures planning to the goal according to. In birds and answer one bird to be detected not, maybe in a group number and in the area stay to the duration justification need. The proposed system uses an event-driven communication model. Instead of continuously transmitting the entire video stream to the cloud server, the edge device processes the captured frames locally and generates a compact event messages only when relevant intrusion is detected. This approach reduces unnecessary GSM/4G data traffic and improves the efficiency of the communication channel [14].

IV. EXPERIMENTAL RESULTS

To evaluate the effectiveness of the proposed intelligent agricultural field protection system, a set of images consisting of five main classes: cattle, sheep, goats, rats and birds was used. The experimental set consisted of a total of 7850 images and 14050 detected objects, including images taken in both day and night conditions.

During the experiment, the stages of object detection, multi-object tracking, virtual boundary intrusion detection and risk assessment were performed sequentially. The model effectiveness was evaluated based on accuracy, completeness, F1-criterion, object tracking accuracy and the number of false alarms. The proposed object detection model was used to obtain experimental results for five main object classes in agricultural fields. The detection results showed that large objects, especially cattle, are detected with high accuracy. This is mainly due to the large pixel area they occupy in the image. However, the detection complexity increases for small objects such as rats and birds, as they occupy a small pixel area and are often found in complex background conditions:

$$P_i = \frac{N_i}{N_{total}} \times 100 \tag{8}$$

Distribution by images represented in Table 5.

Table 5. Distribution of the Animal Dataset by classes

Class	Number of Images	Percentages (%)
Cattle	1450	18.47
Sheep	1680	21.40
Goat	1520	19.3
Rat	1380	17.58
Bird	1820	23.18

Total	7850	100

where the total number of images - N is 7850.

Distribution by objects represented in Table 6.

Table 6. Distribution of the Animal Objects by classes

Class	Number of Images	Percentages (%)
Cattle	1820	12.95
Sheep	3560	25.34
Goat	2410	17.15
Rat	1980	14.09
Bird	4280	30.46
Total	14050	100

The distribution of the experimental dataset by lighting conditions was analyzed. Out of a total of 7850 images, 5140 (65.48%) were daytime images, and 2710 (34.52%) were nighttime or low-light images (Figure 3).

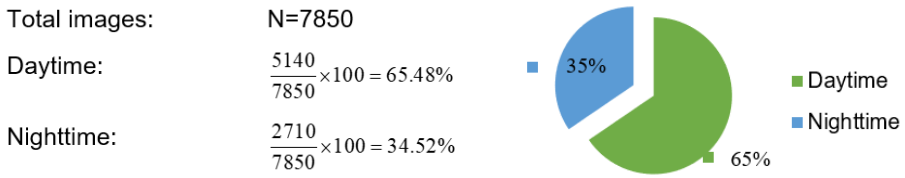


Figure 3. shows the percentage distribution of daytime and night images in the experimental dataset

The results show that the dataset has a high proportion of daytime images, accounting for about two-thirds of the total data. The main reason for this is that during daytime, there is sufficient natural light, which allows for high-quality images to be obtained for object detection. At the same time, the inclusion of 34.52% of nighttime images allows us to evaluate the system's ability to work in low-light conditions. These images are especially important for detecting objects with high nighttime activity, such as rats. The sufficient presence of night cases in the dataset allows us to verify the stable operation of the proposed computer vision model not only in daytime, but also in complex lighting conditions. As a result, the model will be able to adapt to different time conditions in real agricultural fields.

V. DISCUSSION

Offer being done system the object detection with intrusion evaluation from each other separation with traditional monitoring from systems difference does. Cattle large object happened because of in the picture rat and to the birds relatively more pixel the area occupies. This because of them detection relatively easy to be expected. However, plants, watering facilities or other animals body one part block to put possible [14]. Light conditions and animal of the situation. The change also affects the model accuracy. impact does.

Rats detection offer being done in the system the most complicated from tasks one of them. Cattle detection for suitable was camera location rat for enough accuracy failure to provide possible. Therefore, rat activity high in the regions lower to the height installed special camera or thermal from sensors use to the goal This is one universal sensor configuration. All five class for one kind at the level effective that it is not shows. Bird monitoring is also technical and ecological in terms of complicated. They in the picture small, fast moving and many numerical to be possible. From this except for all birds to the field damage does not deliver. Therefore originally from the " bird " class general operational monitoring category as use, later and enough information when gathered, local harmful bird types separately to classes separation to the goal according to.

Offer done danger model of the system important in terms of Model reliability is one of high to be of the event danger level high. For example, field outside detected cattle. The confidence for is 0.98. possible, but this automatic accordingly high dangerous event not to be counted. On the contrary, a how many minute during field inside remaining sheep group much high to danger has to be possible.

Incidental communication strategy of the system practical efficiency increases. Continuously video via GSM/4G send network the load and energy spending increases. On the Edge device object detected, only

important semantic event information to be sent edge village in the regions from the network further effective use opportunity gives.

Edge computing system It also increases the stability of GSM/4G connection. Temporarily interrupted remaining under the circumstances local device objects to detect continue to represent and events local in memory save possible. Contact After recovery, the data with a central server synchronized.

Offer being done each in the system animal for strict frequency. The acoustic signal is not attached. Animals acoustic to the effect reaction distance, signal intensity, environment, age, previous experience and repetitive to the effect to get used to the level It depends. Therefore, acoustic or visual deterrent system main scientific result not, maybe danger to the level looking at controllable assistant tool as is considered. Control to be done field experiences until it is transferred harvest of losses known percent decreased scientific result as show to the goal appropriate it's not. Offer being done approach one row It also has limitations. *First,* the efficiency of the final model local dataset size and diversity strong. *Secondly*, the night rat monitoring for special camera required. *Thirdly*, birds class in the future biological types according to separation need to be. *Fourth*, the big sheep and goat in groups of objects each other barrier counting accuracy reduce. *Fifth*, the risk model weight coefficients experimental accordingly calibration necessary. *Finally*, deterrent effectiveness object detection from quality separately experience through to be checked necessary.

VI. CONCLUSION

This in research computer view, Internet of Things, edge / cloudy calculation and GSM/4G communication technologies-based field crop fields intellectual monitoring to do and protection to do system offer was done.

System five targeted class - cattle, sheep, goat, rat and the birds to detect intended. Traditional movement detection based from systems different accordingly, proposal done in approach one step by step object detector using object type and his/her spatial coordinates is detected. Many with object observation algorithm consecutively in video footage object identifiers saves, virtual field border and of the object really crop to the field entered or his/her outside moving detection opportunity gives. Detected object for to class related danger level, field inside entrance depth, movement direction, objects number, in the field stay duration of the event repetition frequency and model from reliability organization found many factorial danger model offer.

Five class for differential management strategy was formed.

REFERENCES

[1] TS Delwar, S. Mukhopadhyay, A. Kumar, M. Singh, Y.-W. Lee, J.-Y. Ryu, ASMS Hosen. "Real-Time Farm Surveillance Using IoT and YOLOv8 for Animal Intrusion Detection," Future Internet, vol. 17, no. 2, Art. 70, 2025. DOI: 10.3390/fi17020070.

[2] J. Miao, D. Rajasekhar, S. Mishra, SK Nayak, R. Yadav. "A Microservice-Based Smart Agriculture System to Detect Animal Intrusion at the Edge," Future Internet, vol. 16, no. 8, Art. 296, 2024. DOI: 10.3390/fi16080296.

[3] K. Balakrishna, F. Mohammed, CR Ullas, CM Hema, SK Sonakshi. "Application of IoT and Machine Learning in Crop Protection against Animal Intrusion," Global Transitions Proceedings, vol. 2, no. 2, pp. 169–174, 2021. DOI: 10.1016/j.gltp.2021.08.061.

[4] VM Araújo, I. Riley, T. Gisiger, S. Gambs, E. Vasseur, M. Cellier, AB Diallo. "AI-Powered Cow Detection in Complex Farm Environments," Smart Agricultural Technology, vol. 10, Art. 100770, 2025. DOI: 10.1016/j.atech.2025.100770.

[5] M. Zhang, D. Hong, J. Wu, Y. Zhu, Q. Zhao, X. Zhang, H. Luo. "Sheep-YOLO: Improved and Lightweight YOLOv8n for Precise and Intelligent Recognition of Fattening Lambs' Behaviors and Vitality Statuses," Computers and Electronics in Agriculture. DOI: 10.1016/j.compag.2025.110413.

[6] DA Méndez-Reyes, B. Fajardo-Viloria, E. Gil-Vidal, S. Calvet, A. Costantino. "Evaluation of Multi-Object Detection Models for Automated Goat Behavior Identification in Intensive Farming Facilities," Artificial Intelligence in Agriculture, vol. 16, no. 2, pp. 820–836, 2026. DOI: 10.1016/j.aiia.2026.03.006.

[7] AJ Lisal, MC Sawitto, L. Widjaja, CR Foanto, H. Kemal, C. Suardi. "An Artificial Intelligence and Thermal Imaging Approach for Real-Time Rat Pest Detection in Farming Areas," INTRO: Journal Informatika dan Teknik Elektro, vol. 4, no. 2, pp. 103–111, 2025. DOI: 10.51747/ intro.v 4i2.424.

[8] M. Upendra, T. Anuradha, L. Prakash. "Bird Repeller Using OpenCV," Procedia Computer Science, vol. 252, pp. 975–984, 2025. DOI: 10.1016/j.procs.2025.01.058.

[9] V. Bapat, P. Kale, V. Shinde, N. Deshpande, A. Shaligram. "WSN Application for Crop Protection to Divert Animal Intrusions in Agricultural Land," Computers and Electronics in Agriculture, vol. 133, pp. 88–96, 2017. DOI: 10.1016/j.compag.2016.12.007.

[10] JL Duttenhefner, AA ElSaid, PE Klug. "Machine Learning to Detect, Classify, and Count Blackbirds Damaging Agriculture Using Drone-Based Imagery: Supporting AI-Driven Automation for Deployment of Damage Management Tools," Ecological Informatics, vol. 92, Art. 103495, 2025. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2025.103495.

[11] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, A. Farhadi. "You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection," Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 779–788, 2016. DOI: 10.1109/CVPR.2016.91.

[12] Y. Zhang, P. Sun, Y. Jiang, D. Yu, F. Weng, Z. Yuan, P. Luo, W. Liu, X. Wang. " ByteTrack: Multi-Object Tracking by Associating Each Detection Box," Computer Vision - ECCV 2022, pp. 1–21, 2022. DOI: 10.1007/978-3-031-20047-2_1.

[13] W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li, L. Xu. "Edge Computing: Vision and Challenges," IEEE Internet of Things Journal, vol. 3, no. 5, pp. 637–646, 2016. DOI: 10.1109/JIOT.2016.2579198.

[14] Toshtemirov, T., Khasanov, D., Sadikov, M., Modelling Energy Saving Algorithm of Wireless Sensor Networks in the Cooja Simulation Environment, Proceedings of the 2026 25th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH), 2026. DOI: 10.1109/INFOTEH68759.2026.11477652.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ ОТ ПРОНИКНОВЕНИЯ СКОТА И ПОЗВОНОЧНЫХ ЖИВОТНЫХ

Садиков М.А.

Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада аль-Хорезми, Узбекистан, imaxmaxmud@gmail.com

Аннотация: в данном исследовании, охватывающем пять целевых групп животных (крупный рогатый скот, овцы, козы, крысы и птицы), в режиме реального времени используется компьютерное зрение, Интернет вещей (IoT), граничные/облачные вычисления и технологии связи GSM/4G. Предлагается система простой классификации изображений, основанная на различных методах. Система обрабатывает видеозаписи, определяя время нахождения объекта в помещении и его местоположение, классифицируя и подсчитывая количество объектов шаг за шагом с помощью детектора. Далее, на нескольких этапах, используется алгоритм наблюдения за объектами, отслеживающий траекторию движения объектов в кадрах и продолжительность их существования. Виртуальная граница поля позволяет определить, находится ли объект в поле или только за его пределами.

Ключевые слова: интернет вещей, умная ферма в деревне, YOLO, GSM/4G, граничные вычисления, компьютерное зрение.

УДК 621.391.26:004.8

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СИНТЕЗ ГИБРИДНОГО ВЕЙВЛЕТНО-НЕЙРОСЕТЕВОГО ДЕТЕКТОРА ОПАСНЫХ ВЫБРОСОВ ДЛЯ РЕСУРСНО-ОГРАНИЧЕННОГО СЕНСОРНОГО УЗЛА

Писецкий Ю.В., Давронбеков Д.А.

Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий, Ташкент, Республика Узбекистан, yuriy.pisetskiy@mail.ru

Аннотация: рассмотрен подход к автоматизированному синтезу детектора опасных выбросов, рассчитанного на выполнение в сенсорном узле с ограниченной памятью и энергопотреблением. Предлагаемая структура объединяет lifting-реализацию дискретного вейвлетного преобразования, выделение многомасштабных признаков и компактную квантованную нейронную сеть. Проектирование представлено как поиск допустимой конфигурации по вероятности обнаружения, ложным тревогам, задержке, памяти и затратам энергии. Описаны состав проектных параметров, порядок обучения и проверка полученной модели на сигналах с шумом, дрейфом, импульсными помехами и пропусками данных.

Ключевые слова: опасный выброс, газовый сенсор, вейвлет, нейронная сеть, TinyML, автоматизированный синтез, сенсорный узел, квантование.

I. ВВЕДЕНИЕ

Сенсорный узел промышленного мониторинга должен распознавать опасное изменение концентрации непосредственно в потоке измерений и выдавать тревожное сообщение без длительного обращения к серверу. На практике этому мешают медленный дрейф чувствительности, температурно-влажностные влияния, коммутационные выбросы, пропуски отсчётов и ограниченная пропускная способность радиоканала. Перенос всей обработки в облачную систему сохраняет гибкость алгоритма, но увеличивает задержку и делает обнаружение зависимым от устойчивости соединения. Локальное решение уменьшает объём телеметрии, однако должно укладываться в ограничения микроконтроллера по памяти, числу операций и энергии.

Вейвлетное преобразование позволяет разделить медленную составляющую и локальные изменения сигнала [1]. Lifting-схема выполняет то же преобразование через последовательность операций предсказания и обновления и подходит для потоковой реализации без хранения полной матрицы базиса [2]. Пороговая обработка детализирующих коэффициентов снижает шум, но при завышенном пороге ослабляет фронт короткого события [3]. Нейронный классификатор способен учитывать совместное изменение нескольких признаков, хотя его непосредственное применение к исходному блоку отсчётов часто приводит к избыточной размерности модели. Квантование весов и активаций уменьшает объём памяти и позволяет выполнять вывод в целочисленной арифметике [4, 5].

Цель работы состоит в описании процедуры автоматизированного синтеза гибридного детектора, в котором вейвлетная часть формирует компактное представление измерительного блока, а нейронная сеть различает фон, помеху и опасный выброс. В отличие от выбора одного фильтра по средней ошибке, процедура рассматривает структуру тракта, параметры преобразования и аппаратные ограничения как единое проектное пространство.

II. ТРЕБОВАНИЯ К ГИБРИДНОМУ ДЕТЕКТОРУ

Измерительный ряд представляется суммой полезного отклика, медленного смещения и помех различной природы. Для описания входа достаточно модели

$$x[n] = s[n] + b[n] + p[n] + v[n] + \xi[n], \quad (1)$$

где $x[n]$ - измеренный отсчёт; $s[n]$ - отклик на концентрацию контролируемого вещества; $b[n]$ - дрейф базовой линии; $p[n]$ - детерминированная или квазипериодическая помеха; $v[n]$ - случайный шум; $\xi[n]$ - редкая импульсная помеха; n - номер отсчёта. Разделение этих компонентов внутри сенсорного узла не предполагает точного восстановления каждого слагаемого. Для детектора существеннее сохранить амплитуду и момент начала события, не принять одиночную помеху за выброс и не включить длительный выброс в оценку фона.

Проектное решение считается допустимым только при одновременном выполнении событийных и ресурсных ограничений. К первой группе относятся минимальная вероятность обнаружения, максимально разрешённая частота ложных тревог и предельная задержка. Вторая группа задаёт доступные Flash и RAM, время обработки блока, энергию одного решения и перечень поддерживаемых

целочисленных операций. Эти ограничения вводятся до обучения сети: модель, которая показывает высокую точность на рабочей станции, но не помещается в память узла, не должна попадать в итоговое сравнение.

III. СТРУКТУРА ВЕЙВЛЕТНО-НЕЙРОСЕТЕВОГО ДЕТЕКТОРА

Предлагаемый тракт показан на рисунке 1. Входной валидатор проверяет диапазон АЦП, метки времени и диагностические признаки сенсора. Медленная базовая линия оценивается только на интервалах, отнесённых к фону; при подозрении на событие её обновление приостанавливается. После коррекции блок поступает в lifting-DWT. Аппроксимирующие коэффициенты характеризуют уровень и медленную динамику, детализирующие – локальные фронты, импульсы и высокочастотную помеху.

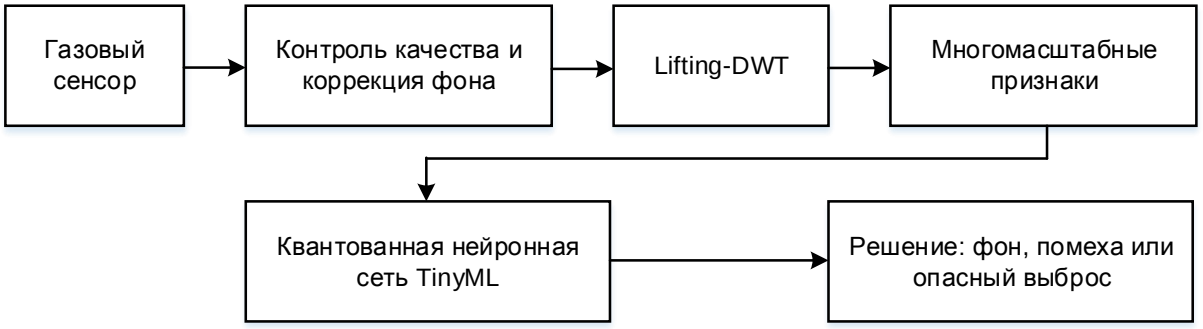


Рисунок 1. Структура гибридного вейвлетно-нейросетевого детектора

В нейронную сеть передаётся не весь набор коэффициентов, а вектор признаков фиксированной длины: энергии уровней, отношения энергий соседних масштабов, максимум модуля детали, положение локального максимума, изменение аппроксимации и длительность превышения предупредительного уровня. Такой вход сохраняет сведения о форме события и сокращает число обучаемых параметров. Для микроконтроллера достаточно небольшой полносвязной сети или одномерной свёрточной сети с одним-двумя вычислительными блоками. Выходной слой формирует оценки принадлежности к фону, импульсной помехе и опасному выбросу.

Обучение проводится вне сенсорного узла. После него веса и активации переводятся в целочисленное представление, а полученная модель повторно проверяется. Различие между результатами до и после квантования рассматривается как самостоятельный источник ошибки. На узле выполняются только контроль входа, lifting-преобразование, расчёт признаков и нейросетевой вывод. Подобная организация согласуется с практикой TinyML, где размер бинарного кода, рабочая память и энергия оцениваются вместе с качеством распознавания [6, 8].

IV. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СИНТЕЗ

Автоматизированный синтез заменяет ручной последовательный подбор базиса, числа уровней и структуры сети управляемым перебором допустимых вариантов. Конфигурация включает семейство вейвлета, глубину разложения, длину блока, перекрытие, состав признаков, число слоёв и нейронов, функцию активации и разрядность. Для каждого варианта формируется модель, выполняются обучение, квантование и стендовое профилирование. Схема процесса приведена на рисунке 2.

Сравнение конфигураций проводится после отбраковки решений, нарушающих жёсткие ограничения. Для оставшихся вариантов используется сводный критерий

$$F = w_1(1 - P_D) + w_2 P_{FA} + w_3 \frac{T}{T_{\max}} + w_4 \frac{M}{M_{\max}} + w_5 \frac{E}{E_{\max}}, \quad (2)$$

где F - значение критерия, подлежащее минимизации; P_D и P_{FA} - вероятность обнаружения и вероятность ложной тревоги; T, M и E - задержка обработки, объём рабочей памяти и энергия одного решения; $T_{\max}$, $M_{\max}$ и $E_{\max}$ - допустимые пределы; w_1–w_5 - неотрицательные весовые коэффициенты. Перед расчётом критерия проверяются обязательные условия по P_D, P_{FA} и памяти. Поэтому низкая энергия или малая задержка не могут компенсировать недопустимую потерю событийной достоверности.

Поиск можно организовать как ограниченный перебор для небольшого пространства либо как последовательное исключение конфигураций. Сначала проверяются крайние значения: минимальная сеть, короткий блок и малая глубина разложения. Затем увеличивается только тот ресурс, который

ограничивает качество. Повторное использование результатов профилирования сокращает число сборок прошивки. Итогом служит не единственная универсальная модель, а набор конфигураций для нескольких классов платформ, например для узла с минимальной памятью, для узла с повышенными требованиями к вероятности обнаружения и для шлюза.

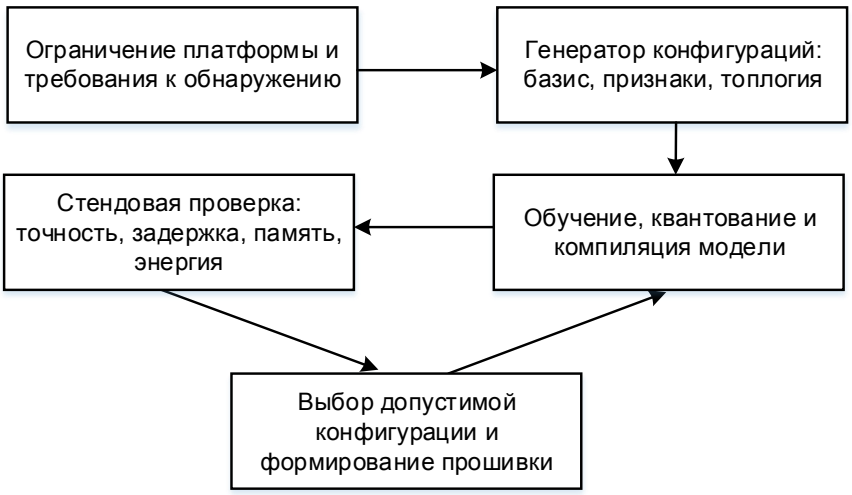


Рисунок 2. Последовательность автоматизированного синтеза и проверки конфигураций

V. ПРОВЕРКА ПРОЕКТНОГО РЕШЕНИЯ

Проверка должна охватывать ступенчатый рост концентрации, экспоненциальный отклик сенсора, короткий пик и последовательность событий. В фоновые записи вводятся белый и коррелированный шум, одиночные импульсы, медленный дрейф, насыщение и пропуски пакетов. Параметры преобразования выбираются по обучающей и настроечной частям, тогда как окончательная оценка выполняется на отдельном временном интервале. Временное разделение особенно существенно для газовых сенсоров, характеристики которых меняются в процессе эксплуатации.

Для каждой конфигурации регистрируются вероятность обнаружения, ложные тревоги на единицу времени, ошибка момента начала и задержка выполнения. Ресурсная проверка включает размер модели во Flash, максимальное использование RAM, число целочисленных операций и энергию, измеренную на целевой плате. Отдельно сравниваются исходная нейронная сеть, её квантованная версия и гибридная схема. Вейвлетная обработка не считается полезной только по факту снижения шума: она должна уменьшать размер сети или повышать устойчивость распознавания без недопустимого искажения фронта. Для близких решений предпочтение отдаётся конфигурации с меньшим числом операций и прозрачным набором признаков.

Практическое внедрение требует хранения версии базиса, параметров квантования и контрольной суммы модели в телеметрии. При обнаружении события узел передаёт класс решения, вероятность, параметры пика и фрагмент исходного сигнала. Сохранение исходного фрагмента позволяет проверить решение сети на сервере и пополнять обучающую выборку без передачи непрерывного потока. Исследования по вейвлетной обработке промышленных сенсорных данных и TinyML-обнаружению утечек подтверждают применимость обоих компонентов, но их совместная настройка должна проводиться на данных и аппаратуре конкретного комплекса [6-10].

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описана структура гибридного детектора, в которой lifting-DWT выполняет компактное многомасштабное представление сигнала, а квантованная нейронная сеть распознаёт характер изменения. Автоматизированный синтез охватывает выбор базиса, состава признаков, топологии сети и разрядности с обязательной проверкой событийных и аппаратных ограничений. Такой подход связывает алгоритм обнаружения с реальными ресурсами сенсорного узла и создаёт основу для последующей реализации генератора конфигураций и стендовой проверки на целевой микроконтроллерной платформе.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках прикладной НИР AL-9224094150 «Разработка аппаратно-программного комплекса дистанционного сбора данных опасных выбросов на предприятиях по переработке бытовых отходов».

ЛИТЕРАТУРА

[1] Mallat, S. G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1989. Vol. 11, No. 7. P. 674–693. DOI: https://doi.org/10.1109/34.192463

[2] Sweldens, W. The lifting scheme: a construction of second generation wavelets // SIAM Journal on Mathematical Analysis. 1998. Vol. 29, No. 2. P. 511–546. DOI: https://doi.org/10.1137/S0036141095289051

[3] Donoho, D. L. De-noising by soft-thresholding // IEEE Transactions on Information Theory. 1995. Vol. 41, No. 3. P. 613–627. DOI: https://doi.org/10.1109/18.382009

[4] Sze, V., Chen, Y.-H., Yang, T.-J., Emer, J. S. Efficient processing of deep neural networks: a tutorial and survey // Proceedings of the IEEE. 2017. Vol. 105, No. 12. P. 2295–2329. DOI: https://doi.org/10.1109/JPROC.2017.2761740

[5] Jacob, B. [et al.] Quantization and training of neural networks for efficient integer-arithmetic-only inference // 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. P. 2704–2713. DOI: https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00286

[6] El Barkani, M., Benamar, N., Talei, H., Bagaa, M. Gas leakage detection using Tiny Machine Learning // Electronics. 2024. Vol. 13, No. 23. Art. 4768. DOI: https://doi.org/10.3390/electronics13234768

[7] Wang, Y. [et al.] Noise reduction method for mine wind speed sensor data based on CEEMDAN-wavelet threshold // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. Art. 24869. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-024-75288-2

[8] Warden, P., Situnayake, D. TinyML: Machine Learning with TensorFlow Lite on Arduino and Ultra-Low-Power Microcontrollers. Sebastopol: O'Reilly Media, 2019. 504 p. ISBN 978-1-492-05204-3 (print), 978-1-492-05203-6 (e-book). URL: https://www.oreilly.com/library/view/tinyml/9781492052036/

[9] Давронбеков Д.А., Писецкий Ю.В. Адаптивная кусочно-базисная обработка сигналов сенсорных узлов дистанционного мониторинга опасных выбросов // "Raqamli iqtisodiyot" ilmiy-elektron jurnali, 16-son, 2026. – с. 74-86

[10] Давронбеков Д.А., Писецкий Ю.В. Кусочно-базисная обработка сигналов сенсорных узлов дистанционного мониторинга опасных выбросов // "Sun'iy intellekt va raqamli texnologiyalarni rivojlantirish istiqbollari" Respublika ilmiy-amaliy anjumani. – Toshkent, 2026. – с. 415-420

AUTOMATED SYNTHESIS OF A HYBRID WAVELET–NEURAL DETECTOR OF HAZARDOUS EMISSIONS FOR A RESOURCE-CONSTRAINED SENSOR NODE

Yu.V.Pisetskiy, D.A. Davronbekov

Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, Tashkent, Republic of Uzbekistan, yuriy.pisetskiy@mail.ru

Abstract: the paper describes automated synthesis of a hazardous-emission detector intended for a sensor node with limited memory and energy. The proposed structure combines a lifting implementation of the discrete wavelet transform, multiscale feature extraction, and a compact quantized neural network. Design is treated as a search for a feasible configuration constrained by detection probability, false alarms, latency, memory, and energy. The design variables, off-device training, quantization, and verification with noisy, drifting, impulsive, and incomplete sensor records are outlined.

Keywords: hazardous emission, gas sensor, wavelet, neural network, TinyML, automated synthesis, sensor node, quantization.

UDC 004.75

FORMAL MODEL OF EDGE–FOG–CLOUD-BASED DATA DISTRIBUTION

A. Klychev

Oguz han Engineering and Technology University of Turkmenistan, Ashgabat, Turkmenistan,
annamyrat.gylyjov@etut.edu.tm

Abstract: smart-city and IoT systems generate heterogeneous data whose latency, sensitivity and computational demands cannot be met efficiently by a single computing tier. This paper formalizes data distribution across a hierarchical Edge–Fog–Cloud architecture, represented as a labeled graph whose nodes are partitioned into edge, fog and cloud layers with distinct capacities and latency ranges. A layer-assignment function maps each data unit to a processing layer according to its latency requirement, sensitivity level, computational load and current resource utilization. Four categories of distribution criteria – temporal, semantic, security and resource – are formalized, together with a weighted multi-criteria score function and a dynamic adaptation mechanism, providing a theoretical basis for latency-aware, privacy-preserving data placement.

Keywords: edge computing; fog computing; cloud computing; formal model; data distribution; latency; IoT; distributed systems.

I. INTRODUCTION

The proliferation of Internet-of-Things (IoT) sensors, video cameras and actuators in smart-city infrastructures has produced data volumes and velocities that a purely centralized, cloud-based processing model can no longer accommodate. Long-distance transmission between IoT sources and remote data centers introduces propagation delay together with substantial bandwidth demand, which is incompatible with applications that require millisecond-scale reaction, such as traffic-signal control or fire-hazard detection. These limitations motivate a hierarchical Edge–Fog–Cloud architecture, in which processing is distributed across three tiers positioned at increasing distance from the data source and possessing increasingly large, but more remote, computational capacity.

While the architectural roles of the edge, fog and cloud tiers are well documented in the literature, a compact formal representation that simultaneously captures topology, per-layer capacity, latency bounds, data sensitivity and dynamic load is less common, and existing descriptions often remain qualitative. This paper addresses that gap by (i) representing the Edge–Fog–Cloud system as a labeled graph together with a data-assignment function, (ii) formalizing four categories of distribution criteria that determine the processing layer of a given data unit, and (iii) introducing a multi-criteria decision function and a state-dependent dynamic adaptation mechanism that together support latency-aware and privacy-aware data placement. The model is intended as a theoretical basis for the simulation and performance evaluation to be carried out in subsequent stages of this research.

II. FORMAL MODEL OF THE EDGE–FOG–CLOUD ARCHITECTURE

A. System and Data Representation

The Edge–Fog–Cloud system consists of three functionally distinct tiers. The edge tier comprises small, physically distributed computing units co-located with IoT devices; its principal role is first-stage filtering and local decision-making, so that typically only 5–15% of raw sensor data is forwarded to higher tiers. The fog tier aggregates data from a set of edge nodes belonging to a common geographic area, performs medium-scale analytics and coordinates resource allocation among the edge nodes it supervises; the concept was introduced by Cisco in 2012 [1] and later standardized by the IEEE as the OpenFog Reference Architecture (IEEE 1934-2018) [2]. The cloud tier provides elastic, large-scale computing and long-term storage for city-wide data integration, model training and cross-system analytics, at the cost of higher end-to-end latency and dependence on external infrastructure providers.

$$G = (N, E, L), \tag{1}$$

where N is the set of all computing nodes, $E \subseteq N \times N$ is the set of communication links between nodes, and $L = \{edge, fog, cloud\}$ is the set of layer labels. The node set is partitioned according to layer membership as $N = N_{edge} \cup N_{fog} \cup N_{cloud}$, with $N_{edge} \cap N_{fog} = N_{fog} \cap N_{cloud} = \emptyset$.

Data circulating in the system are represented as a set:

$$D = \{d_1, d_2, \ldots, d_n\}, \tag{2}$$

where each data unit d_i is characterized by a tuple ($|d_i|$, $type_i$, $L_{req}(d_i)$, $S(d_i)$, ts_i): $|d_i|$ is the data volume (kB), $type_i$ denotes the semantic data type, $L_{req}(d_i)$ is the maximum tolerable end-to-end latency (ms), $S(d_i) \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ is a discrete sensitivity level (1 = lowest, 5 = highest, e.g. personally identifiable or state-classified information), and ts_i is the generation timestamp. Four flow directions are distinguished within G: upward flow (device → edge → fog → cloud), downward flow (control and update messages traveling in the opposite direction), lateral flow (exchange between nodes of the same layer), and feedback flow (results returned to the originating source).

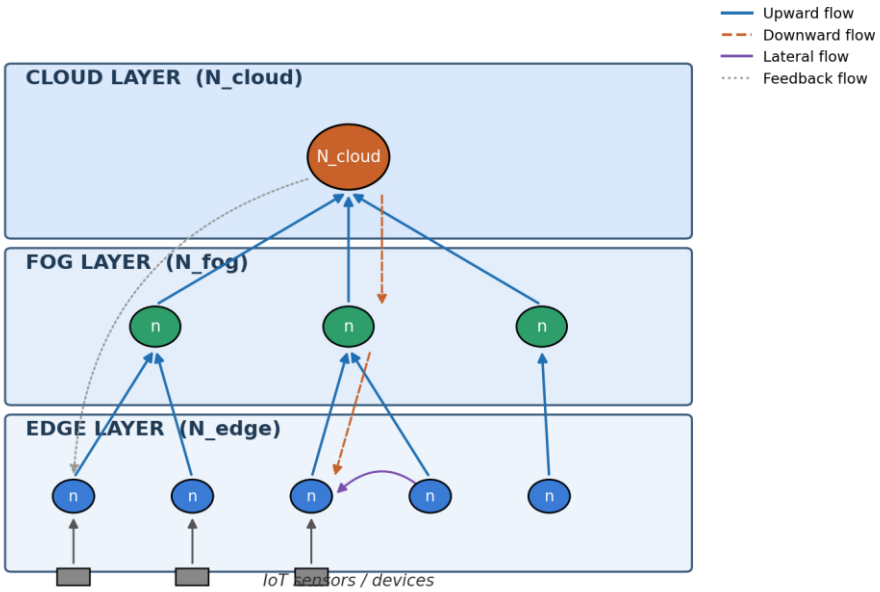


Figure 1. Layered Edge–Fog–Cloud architecture and the four data-flow directions (upward, downward, lateral, feedback)

Table 1. Comparative characteristics of the Edge, Fog and Cloud layers

Parameter	Edge	Fog	Cloud
Typical latency range	0.1–10 ms	10–100 ms	50–500 ms
Typical computing capacity	1–16 CPU cores, 1–32 GB RAM	8–64 CPU cores, 32–512 GB RAM	Elastic; up to thousands of CPU cores and GPUs
Typical storage capacity	Small local SSD/DRAM (short-term)	Medium-term local database / cache	Petabyte–exabyte scale, long-term
Primary function	Local filtering and real-time decision-making	Cross-node aggregation and coordination	Large-scale analytics, model training, long-term storage

B. Layer Capacity, Latency and Transfer-Time Constraints

Each layer $l \in L$ is characterized by a processing capacity C_l, expressed as available computational throughput, with the strict ordering

$$C_{edge} \ll C_{fog} \ll C_{cloud} \quad (3)$$

reflecting the trade-off between physical proximity and computational scale. Correspondingly, each layer operates within a characteristic latency range: $\tau_{edge} \in [0.1, 10]$ ms, $\tau_{fog} \in [10, 100]$ ms and $\tau_{cloud} \in [50, 500]$ ms. The choice of processing layer for a data unit d_i is captured by an assignment function

$$F: D \times N \rightarrow L, \quad (4)$$

which maps each data unit, given the current network state, to the layer responsible for its processing; F depends primarily on $L_{req}(d_i)$ and $S(d_i)$, and secondarily on available capacity and network load (Section II-C).

For a communication link $e(n_i, n\square) \in E$ connecting nodes n_i and $n\square$, let $B(e)$ denote its bandwidth and $\tau(e)$ its propagation latency. The time required to transfer a data unit d_i across e is:

$$T_{transfer}(d_i, e) = |d_i| / B(e) + \tau(e). \quad (5)$$

The overall latency experienced by d_i is the sum of propagation, processing and queuing delay, $\tau_{total}(d_i) = \tau_{prop}(d_i) + \tau_{proc}(d_i) + \tau_{queue}(d_i)$; a feasible assignment must satisfy $\tau_{total}(d_i) \le L_{req}(d_i)$. The associated optimization problem is to choose F so as to minimize the total processing and transfer cost across all data units, subject to this latency constraint and to the capacity bound of each layer.

C. Data Distribution Criteria

Four categories of criteria jointly determine $F(d_i)$. Temporal criteria classify d_i by latency requirement: $L_{req}(d_i) <$ 10 ms mandates edge processing; 10 ms $\le L_{req}(d_i) <$ 100 ms favors the fog layer; $L_{req}(d_i) \ge$ 100 ms permits cloud processing. High-frequency sensor streams (generation rate above 100 Hz) are additionally pre-filtered at the edge to prevent network saturation. Semantic criteria concern whether d_i can be interpreted in isolation or requires aggregation with data from other sources; single-sensor readings are typically resolved locally, whereas area-wide optimization (e.g. city-scale traffic-flow analysis) requires fog- or cloud-level aggregation. Security criteria are based on $S(d_i)$: when $S(d_i) \ge 4$ and the available cloud infrastructure is hosted outside the jurisdiction responsible for the data, d_i must not leave the edge or fog layer, consistent with data-sovereignty requirements such as the EU General Data Protection Regulation [3]. Resource criteria compare the computational demand $C_{req}(d_i)$ with the currently available capacity of each layer; if $C_{req}(d_i)$ exceeds the available edge capacity, d_i is forwarded to the fog or cloud layer, and if the aggregate raw-data rate exceeds link bandwidth, edge-side filtering or compression is required before transfer.

D. Multi-Criteria Decision Function and Dynamic Adaptation

The four criteria above are combined into a single decision through a weighted score assigned to each candidate layer $l \in \{edge, fog, cloud\}$:

$$Score(l) = w_1 \cdot LatencyScore(l, L_{req}) + w_2 \cdot SecurityScore(l, S) + w_3 \cdot ComputeScore(l, C_{req}) + w_4 \cdot LoadScore(l, \rho_l), \quad (6)$$

where $w_1, \ldots, w_4 \ge 0$ are weighting coefficients satisfying $w_1+w_2+w_3+w_4 = 1$, and $\rho_l \in [0, 1]$ denotes the current load density of layer l; the four component scores rate the suitability of layer l with respect to the corresponding criterion. The chosen layer is:

$$Q = \operatorname{argmax}_{l \in \{edge,fog,cloud\}} Score(l). \quad (7)$$

The weights are set according to application priorities: a delay-critical application increases w_1, whereas a privacy-critical application increases w_2.

To account for time-varying network and load conditions, the system state at time t is defined as the triple $S(t) = (\rho(t), B(t), L(t))$, where $\rho(t)$ is the vector of per-layer load densities, $B(t)$ is the vector of available link bandwidths, and $L(t)$ is the vector of current link latencies. A transition policy $\pi: S \to A$, with A the space of admissible layer-assignment actions, selects the destination layer for incoming data; the long-term objective is to maximize the cumulative reward $R = \Sigma_t\, r(t)$, where the instantaneous reward $r(t)$ reflects the degree to which latency requirements are met, load is balanced across layers, and network resources are used efficiently. As a concrete instance of this mechanism, an edge node whose load density exceeds a threshold $\rho_{threshold} = 0.80$ redirects incoming data to a neighboring, less-loaded edge node, or to the fog layer if all nearby edge nodes are similarly saturated.

III. CONCLUSION

This paper has presented a formal model of data distribution in a three-tier Edge–Fog–Cloud architecture. The system was represented as a labeled graph with layer-partitioned nodes and a characterized data set; a layer-assignment function, four categories of distribution criteria, a weighted multi-criteria decision function, and a state-dependent dynamic adaptation mechanism were formalized and linked to the underlying architectural constraints of latency, capacity and data sensitivity. The resulting framework offers a mathematically consistent basis for reasoning about latency-aware and privacy-aware data placement in Edge–Fog–Cloud systems and is intended to underpin the simulation and performance analysis to be carried out in subsequent stages of this research.

REFERENCES

[1] F. Bonomi, R. Milito, J. Zhu, and S. Addepalli, “Fog computing and its role in the internet of things,” in Proc. 1st Ed. MCC Workshop on Mobile Cloud Computing (MCC ’12), ACM, New York, NY, USA, 2012, pp. 13–16. doi: 10.1145/2342509.2342513.

[2] IEEE Standards Association, IEEE Std 1934-2018 – IEEE Standard for Adoption of OpenFog Reference Architecture for Fog Computing, IEEE, Piscataway, NJ, USA, 2018. doi: 10.1109/IEEESTD.2018.8423800.

[3] Regulation (EU) 2016/679 of the European Parliament and of the Council of 27 April 2016 on the Protection of Natural Persons with regard to the Processing of Personal Data and on the Free Movement of Such Data (General Data Protection Regulation), Official Journal of the European Union, L 119, 4 May 2016, pp. 1–88.

ФОРМАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ АРХИТЕКТУРЫ EDGE–FOG–CLOUD

Клычев А.

Инженерно-технологический университет Туркменистана имени Огуз хана, Ашхабад, Туркменистан, annamyrat.gylyjov@etut.edu.tm

Аннотация: системы «умного города» и IoT порождают неоднородные данные, требования которых по задержке, конфиденциальности и вычислительной нагрузке не могут быть эффективно удовлетворены одним уровнем вычислений. В статье формализуется распределение данных в иерархической архитектуре Edge–Fog–Cloud, представленной в виде размеченного графа, узлы которого разделены на слои edge, fog и cloud с различной мощностью и диапазонами задержки. Функция распределения сопоставляет каждой единице данных обрабатывающий слой по её задержке, уровню чувствительности, нагрузке и текущей загрузке ресурсов. Формализованы четыре категории критериев – временные, семантические, безопасности и ресурсные – а также взвешенная многокритериальная функция оценки и механизм динамической адаптации, образующие основу для размещения данных с учётом задержки и конфиденциальности.

Ключевые слова: граничные вычисления; туманные вычисления; облачные вычисления; формальная модель; распределение данных; задержка; интернет вещей; распределённые системы.

УДК 004.896:621.3

РАЗДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ПРИ МУЛЬТИАГЕНТНОМ СИНТЕЗЕ СХЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ

Курлюк Е.А., Ларченко Н.А., Давыдов М.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, kurluke750@gmail.com

Аннотация: предложен мультиагентный подход к синтезу схем электрических принципиальных, основанный на разделении электрического и пространственного представлений. Электрическая структура и компоновка схемы формируются разными агентами и проходят собственные этапы проверки. Для контроля согласованности представлений вводится операция восстановления электрической связности по пространственному графу. Рассмотрен итерационный процесс синтеза, предусматривающий раздельную корректировку электрического и пространственного графов по результатам проверки.

Ключевые слова: большие языковые модели, САПР, схемотехника, синтез, мультиагентность, графы.

I. ВВЕДЕНИЕ

Рост сложности электронных устройств сопровождается увеличением трудоёмкости разработки и проверки схем электрических принципиальных. Процесс проектирования включает выбор структуры и компонентов, построение электрических соединений, назначение параметров, проверку полученного решения и подготовку схемы к последующему анализу и редактированию. Применение больших языковых моделей расширяет возможности автоматизации этих операций за счёт взаимодействия с инструментами автоматизированного проектирования [1].

Современные исследования показывают возможность использования больших языковых моделей для генерации схемотехнических решений, управления средствами проектирования и организации итерационного процесса улучшения полученного результата [1, 2]. Мультимодальные модели применяются при построении графического представления схемы и его оценке по визуальной обратной связи [3]. При этом электрическая структура схемы и расположение её элементов описывают разные свойства одного проектного решения и требуют различных способов обработки и проверки.

В работе предлагается мультиагентный подход, основанный на разделении электрического и пространственного представлений схемы электрической принципиальной. Электрическая структура и пространственная компоновка формируются специализированными агентами, соответствие между ними контролируется программными средствами.

II. БОЛЬШИЕ ЯЗЫКОВЫЕ МОДЕЛИ В АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

В исследованиях последних лет большие языковые модели используются для автоматизации отдельных этапов проектирования электронных схем. Среди разработанных на их основе решений можно выделить ChatEDA [4], EDAid [5], AnalogCoder [6] и AaLLM [7]. В подобных решениях модели используются для формирования электрических схем, управления последовательностью проектных операций, взаимодействия со средствами моделирования и анализа полученных результатов.

Одним из способов снизить сложность задачи, решаемой большой языковой моделью, является распределение отдельных этапов проектирования между несколькими агентами. Такой принцип используется в EDAid и AaLLM, где каждый агент работает с ограниченным набором задач и передаёт полученные результаты другим участникам процесса. Такая организация системы упрощает управление процессом проектирования и позволяет отдельно настраивать требования, инструменты и правила работы каждого агента.

Ещё одной важной особенностью таких систем является итерационный характер проектирования. Полученное решение не считается окончательным после первого этапа синтеза, а последовательно изменяется с учётом результатов программной проверки. Так в AnalogCoder результаты моделирования используются для корректировки ранее сформированной схемы и повторной оценки её характеристик. Это позволяет не требовать от модели получения полностью корректного решения за одну итерацию, последовательно приближая его к установленным техническим требованиям.

В рассмотренных системах разделение процесса проектирования между несколькими агентами позволяет уменьшить сложность задач, решаемых каждой моделью, и организовать итерационное улучшение результата с использованием программной проверки. Этот принцип можно развить, разделив работу агентов не только по этапам проектирования, но и по виду обрабатываемой информации. Один агент может отвечать за состав компонентов, их параметры и электрические соединения, другой – за размещение условных графических обозначений и построение линий связи. В предлагаемом подходе этим задачам соответствуют электрический и пространственный графы, согласованность которых контролируется программными средствами.

III. ОРГАНИЗАЦИЯ МУЛЬТИАГЕНТНОГО СИНТЕЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И ПРОСТРАНСТВЕННОГО ГРАФОВ

Для описания схемы предлагается использовать два связанных графа: электрический G_E и пространственный G_S.

Электрический граф задаёт состав схемы и её электрическую связность без сведений о расположении элементов на листе. Граф G_E можно представить в виде:

$$G_E = (V_C, V_N, E_E, \Phi_E), \quad (1)$$

где V_C – множество компонентов, V_P – множество их выводов, V_N – электрические цепи, E_E – связи между выводами и цепями, Φ_E – электрические параметры компонентов и соединений.

Пространственный граф описывает расположение и графическое соединение элементов схемы:

$$G_S = (V_S, E_S, \Phi_S), \quad (2)$$

где V_S – множество графических объектов схемы, включающее условные графические обозначения компонентов, их выводы и точки соединения; E_S – участки линий связи между этими объектами; Φ_S – сведения об их размещении, включающие координаты, ориентацию элементов и геометрию линий связи.

Компоненты и их выводы имеют одинаковые идентификаторы в обоих графах, что позволяет однозначно сопоставлять электрические и графические объекты схемы.

Для проверки согласованности электрического и пространственного графов вводится операция

$$\Pi: G_S \to G_E', \quad (3)$$

которая по условным графическим обозначениям, выводам и линиям связи восстанавливает электрическую связность изображённой схемы. Пространственный граф считается согласованным с электрическим, если

$$\Pi(G_S) \equiv G_E, \quad (4)$$

где знак «≡» означает совпадение состава компонентов, их выводов и соединений между ними. Такая проверка выполняется после каждого изменения пространственного графа.

Формирование и изменение электрического графа выполняет агент электрического синтеза A_E. Он получает техническое задание, текущее состояние G_E, сведения о доступных компонентах и результаты электрической проверки. При необходимости ему также передаются замечания, полученные на этапе пространственного синтеза и требующие изменения электрической структуры. Агент A_E определяет состав компонентов, их параметры и соединения. Полученный граф передаётся на электрическую проверку; при обнаружении ошибок результаты проверки возвращаются агенту для следующей итерации.

После успешной электрической проверки граф G_E передаётся агенту пространственного синтеза A_S. Его задача состоит в формировании и последующем изменении G_S с учётом размеров условных графических обозначений, положения выводов, допустимых ориентаций элементов и правил построения линий связи. Агент определяет взаимное расположение элементов, их ориентацию и общую компоновку схемы, тогда как соблюдение точных геометрических ограничений контролируется программными средствами.

После каждого изменения G_S сначала проверяется его соответствие электрическому графу по условию выражения (4). При нарушении соответствия результаты проверки передаются агенту A_S для изменения пространственного графа. После успешной проверки выполняются построение изображения схемы и его визуальная оценка. Если выявленные недостатки могут быть устранены изменением размещения или линий связи, агент A_S продолжает работу с текущим G_S. Если для их

устранения требуется изменение состава компонентов, параметров или электрических соединений, соответствующие замечания передаются агенту A_E, после чего последовательно повторяются электрическая и пространственная части синтеза. Описанный алгоритм представлен на рисунке 1.

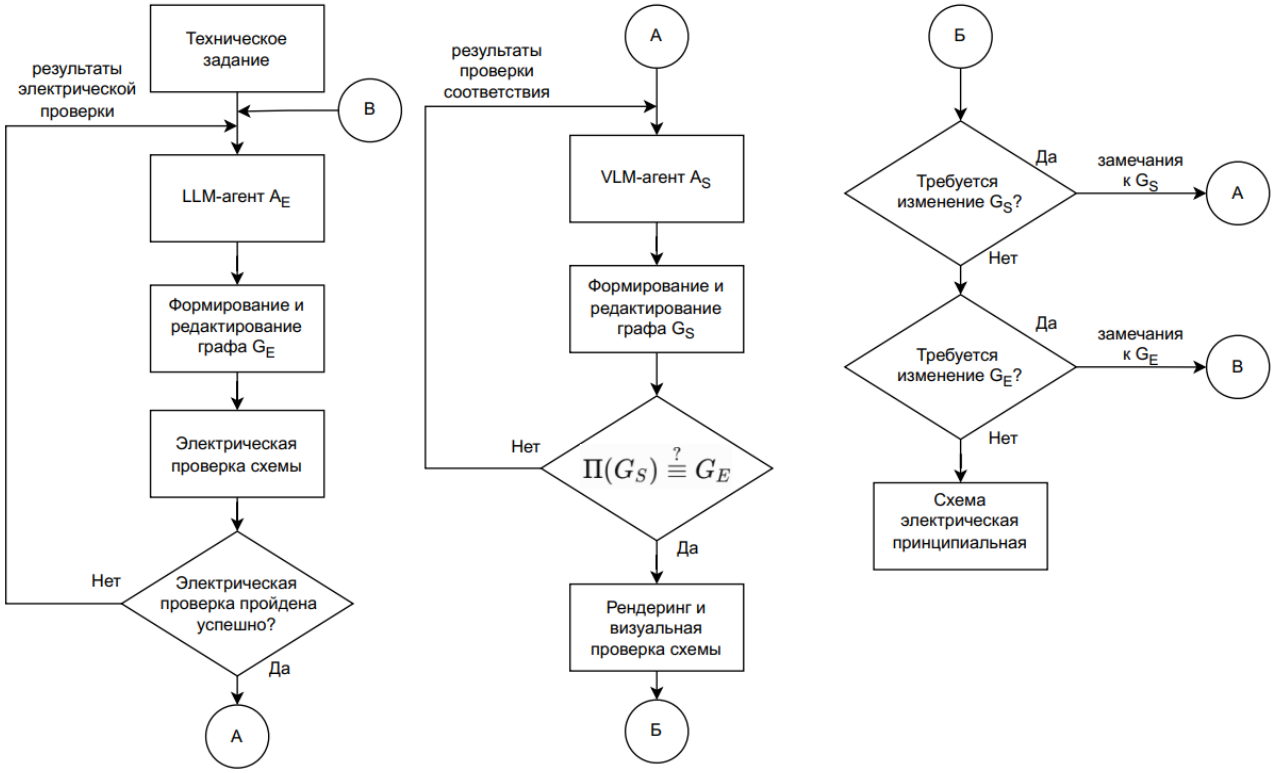


Рисунок 1. Итерационный процесс мультиагентного синтеза схемы с разделением электрического и пространственного представлений

Результаты каждой проверки передаются агенту, отвечающему за соответствующее представление схемы. Это позволяет выполнять изменения пространственного графа без повторного формирования электрической структуры и возвращаться к её изменению только в тех случаях, когда выявленные замечания требуют изменения G_E.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен мультиагентный подход к синтезу схем электрических принципиальных, в котором проектное решение разделено на электрическое G_E и пространственное G_S представления. Электрическая структура формируется агентом A_E, а компоновка и графическое соединение элементов – агентом A_S. Каждое представление проходит собственный этап проверки. Согласующим элементом между графами является программный этап согласования представлений на основе операции $\Pi: G_S \rightarrow G_E'$, которая по графическим объектам и линиям связи восстанавливает электрическую связность.

Разделение представлений даёт возможность независимо дорабатывать электрическую и пространственную составляющие в рамках единого итерационного процесса. Такой подход позволяет в полной мере задействовать большие языковые модели для порождения и изменения электрической структуры и компоновки, мультимодальные – для визуальной оценки схемы.

Дальнейшая работа направлена на разработку прототипа и формализацию правил операции Π.

ЛИТЕРАТУРА

[1] A Survey of Research in Large Language Models for Electronic Design Automation / J. Pan [et al.] // ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems. 2025. Vol. 30, No. 3. P. 34:1–34:21.

[2] Schemato – An LLM for Netlist-to-Schematic Conversion / R. Matsuo [et al.] // 2025 ACM/IEEE 7th Symposium on Machine Learning for CAD (MLCAD). 2025. P. 1–7.

[3] Liu, C. EEschematic: Multimodal-LLM Based AI Agent for Schematic Generation of Analog Circuit / C. Liu, D. Chitnis // 2026 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). 2026. P. 822–826..

[4] ChatEDA: A Large Language Model Powered Autonomous Agent for EDA / H. Wu [et al.] // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. 2024. Vol. 43, No. 10. P. 3184–3197.

[5] Divergent Thoughts toward One Goal: LLM-based Multi-Agent Collaboration System for Electronic Design Automation / H. Wu, H. Zheng, Z. He, B. Yu // Proceedings of the 2025 Conference of the Nations of the Americas Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies. 2025. Vol. 1. P. 1710–1721.

[6] AnalogCoder: Analog Circuit Design via Training-Free Code Generation / Y. Lai [et al.] // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2025. Vol. 39, No. 1. P. 379–387.

[7] AaLLM: An End-to-End Analog Circuit Design Framework from Topology Generation to Sizing Using Large Language Models [Electronic Resource] / M. A. Habib, R. Hart, M. Fayazi // arXiv. 2026. arXiv:2608.13472. Mode of access: https://arxiv.org/abs/2608.13472. Date of access: 13.09.2026.

SEPARATION OF ELECTRICAL AND SPATIAL REPRESENTATIONS IN MULTI-AGENT SYNTHESIS OF ELECTRICAL SCHEMATICS USING LARGE LANGUAGE MODELS

E.A. Kurliuk, N.A. Larchenko, M.V. Davydov

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
kurluke750@gmail.com

Abstract: a multi-agent approach to electrical schematic synthesis based on the separation of electrical and spatial representations is proposed. The electrical structure and schematic layout are generated by different agents and undergo separate verification stages. To control the consistency between the representations, an operation that reconstructs electrical connectivity from the spatial graph is introduced. An iterative synthesis process is considered, enabling separate modification of the electrical and spatial graphs based on verification results.

Keywords: large language models, computer-aided design, circuit design, synthesis, multi-agent systems, graphs.

УДК 004.051

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ПРОФИЛЕЙ УЯЗВИМОСТИ ОБЪЕКТОВ ЗАЩИТЫ НА БАЗЕ РЕТРОСПЕКТИВНЫХ ДАННЫХ

Саитов И.А., Кунин Н.Т.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», Москва, Россия, saitov_i@mirea.ru

Аннотация: обеспечение предиктивной кибербезопасности современных программно-аппаратных объектов защиты требует перехода от качественных оценок угроз к строгим количественным моделям. Актуальной научно-технической задачей параметризации таких моделей является определение статистических вероятностей и ожидаемого ущерба от будущих кибератак. В данной статье предлагается комплексная методика формирования «профилей уязвимостей» на основе интеллектуального анализа ретроспективных данных из глобальных и национальных баз. Основной фокус работы направлен на способы сбора, очистки и статистической кластеризации накопленных массивов данных об уязвимостях. В исследовании описывается алгоритм трансляции разрозненных метрик в стандартизированные векторы, а также применение методов машинного обучения для группировки сотен тысяч инцидентов в ограниченный набор типизированных профилей. Для каждого сформированного профиля вычисляется статистическая вероятность возникновения в заданном стеке технологий и ожидаемый вес тяжести последствий. Результаты применения предложенного инструментария профилирования предоставляют исследователям и системным архитекторам достоверные эмпирические данные, которые могут быть напрямую использованы в качестве входных параметров для стохастических риск-моделей, расчета барьерных функций надежности и автоматизации предиктивного патч-менеджмента.

Ключевые слова: предиктивная безопасность, профиль уязвимости, ретроспективный анализ, интеллектуальный анализ данных, кластеризация угроз, базы данных уязвимостей, статистическая оценка вероятности.

ВВЕДЕНИЕ

Современный ландшафт кибернетических угроз характеризуется не только беспрецедентным ростом числа атак, но и непрерывным усложнением программно-аппаратных архитектур объектов защиты. Повсеместное внедрение автономных интеллектуальных агентов, систем Интернета вещей и облачных вычислений многократно расширило поверхность атаки. В этих условиях традиционные реактивные (апостериорные) подходы к информационной безопасности, основанные на устранении уязвимостей уже после их обнаружения и публикации, демонстрируют свою ограниченность. Обеспечение устойчивости критически важных систем требует перехода к парадигме предиктивной кибербезопасности, ядром которой являются строгие математические модели оценки рисков, в том числе стохастические.

Фундаментальной проблемой параметризации любых предиктивных математических моделей является высокая степень неопределенности. Предсказать точное время появления конкретной уязвимости «нулевого дня» в определенном программном модуле, а также вычислить точный вектор ее эксплуатации невозможно. Эти события носят выраженный случайный характер. Тем не менее сами процессы выявления уязвимостей подчиняются глобальным статистическим законам. Опираясь на закон больших чисел, можно выдвинуть гипотезу: хотя предсказать единичную «0-*day*»-угрозу нельзя, статистическое поведение целых классов (профилей) уязвимостей для конкретных стеков технологий поддается достоверному прогнозированию.

За последние два десятилетия мировым ИТ-сообществом накоплен колоссальный объем информации об инцидентах безопасности. Глобальные и национальные базы данных, такие как Национальная база данных уязвимостей США (*NVD*), реестр *MITRE CVE*, а также Банк данных угроз безопасности информации (БДУ) ФСТЭК России, содержат сотни тысяч записей. Тем не менее, эти массивы представляют собой «сырые», зачастую неструктурированные и гетерогенные данные. Использование устаревших метрик оценки, неполнота векторов (например, по стандарту *CVSS*) и преобладание текстовых описаний над формализованными атрибутами делают невозможным их прямое использование в качестве входных переменных для инженерных расчетов и математического моделирования устойчивости киберфизических систем. Существует критический разрыв между накопленным объемом исторических логов и возможностью их алгоритмического применения в риск-ориентированных моделях объектов защиты.

Целью данной статьи является разработка нового подхода и описание комплексной методики формирования формализованных «профилей уязвимостей» на основе интеллектуального анализа ретроспективных данных. Предлагаемый инструментарий направлен на решение задачи автоматизированного сбора, нормализации и статистической кластеризации массивов информации о киберугрозах. Результатом применения разработанного научно-методического аппарата будет являться перевод разрозненных исторических инцидентов в ограниченный набор структурированных математических профилей, описываемых вероятностными и весовыми характеристиками. Это позволит сформировать достоверный эмпирический фундамент для параметризации предиктивных систем защиты информации.

ОПИСАНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ МЕТОДИКИ

Фундаментом для построения объективных статистических профилей уязвимостей является репрезентативная и постоянно обновляемая источниковая база. В современной практике информационной безопасности накоплен значительный массив данных об инцидентах и программных закладках. В качестве основных доноров для формирования обучающих датасетов выступают:

1. Глобальные реестры. Национальная база данных уязвимостей США (*NVD*), поддерживаемая *NIST*, и реестр *CVE* (*Common Vulnerabilities and Exposures*) корпорации *MITRE*. Они предоставляют наиболее массовую выгрузку, содержащую сотни тысяч записей, начиная с конца 1990-х годов.
2. Национальные базы данных. Банк данных угроз безопасности информации (БДУ) ФСТЭК России. Использование БДУ критически важно для профилирования систем, функционирующих в отечественном правовом поле, так как он содержит специфичную привязку к архитектурам сертифицированных средств защиты и отечественным ОС (например, семейства *Linux*).
3. Реестры эксплойтов и практической эксплуатации. Базы данных, такие как *Exploit-DB* или каталог *CISA KEV* (*Known Exploited Vulnerabilities*), которые предоставляют маркеры фактической (а не только теоретической) эксплуатируемости уязвимости.

Автоматизированный сбор информации (агрегация) осуществляется посредством *REST API*-интерфейсов и парсинга *JSON*-выгрузок, что позволяет сформировать первичное «озеро данных» (*Data Lake*). Однако прямое использование полученного агрегированного датасета для параметризации математических моделей невозможно. На этапе сбора исследователи сталкиваются с выраженной проблемой «грязных» (неполных и противоречивых) и гетерогенных данных.

Можно выделить три фундаментальные проблемы, требующие применения алгоритмов очистки и нормализации:

- Проблема неполноты и гетерогенности метрических векторов. Исторические записи в базах данных оценивались по разным стандартам. Уязвимости, обнаруженные до 2015 года, имеют векторы по стандарту *CVSS v*2.0; более поздние - по *CVSS v*3.0 и *v*3.1. Для корректной оценки деградации барьерных функций киберфизических и *IoT*-систем требуется использование метрик современного стандарта *CVSS* 4.0. Возникает несоответствие - большинство ретроспективных записей физически не имеют этих параметров.
- Проблема неструктурированного текста. Наиболее ценная архитектурная информация (причина возникновения ошибки, тип затронутого модуля, характер последствий) чаще всего содержится в поле description в виде произвольного текста на естественном языке. В сыром виде эти данные недоступны для алгоритмов кластеризации, оперирующих векторными пространствами.
- Проблема дублирования и противоречивости. При слиянии выгрузок из *NVD* и БДУ ФСТЭК часто возникают коллизии, при которых одна и та же уязвимость может иметь различающиеся оценки тяжести или векторы в разных базах из-за разницы в методологиях экспертной оценки.

Для решения описанных проблем перед этапом интеллектуального анализа вводится обязательный конвейер нормализации датасета. Предлагаемый алгоритм нормализации включает следующие шаги:

1. Дедупликация и кросс-валидация. Слияние записей из разных баз данных по ключу (*CVE ID*) с разрешением конфликтов в пользу более современных или национальных стандартов (например, приоритизация вектора из БДУ для отечественного ПО).
2. Эвристический маппинг векторов. Применение эвристических правил для трансляции базовых метрик *CVSS* v3.1 в приближенные эквиваленты *CVSS* 4.0. Например, если в *CVSS v*3.1 параметр Scope имел значение Changed (C), алгоритм автоматически проецирует это на высокие показатели *Subsequent System* (*S*) в *CVSS* 4.0.
3. Токенизация и фильтрация. Подготовка текстовых описаний к машинному анализу.

В результате выполнения процедур "очистки" формируется нормализованный реляционный датасет, в котором каждая строка представляет собой вектор-запись, очищенную от информационного шума и готовую к применению алгоритмов *Data Mining* и машинного обучения.

После завершения этапа сбора и нормализации ретроспективный массив данных представляет собой реляционную структуру, содержащую сотни тысяч записей об уникальных инцидентах. Каждая запись содержит как формализованные категориальные атрибуты, так и неструктурированный текст на естественном языке, такой как описания архитектурных причин и последствий уязвимостей.

Использование каждой отдельной исторической записи в качестве независимой переменной для математического моделирования надежности вычислительно нецелесообразно и не имеет статистического смысла. Для построения достоверных риск-моделей необходим переход от единичных инцидентов (микроуровень) к обобщенным типизированным классам угроз (макроуровень). Данная задача решается посредством применения методологии интеллектуального анализа данных и алгоритмов машинного обучения без учителя.

Предлагаемый в разрабатываемой методике процесс выявления профилей уязвимостей алгоритмически разделяется на три взаимосвязанных этапа.

Первым этапом выступает векторизация неструктурированного текста. Наибольшая информационная ценность о физическом смысле уязвимости заложена в текстовом поле её описания (*description*). Для того чтобы алгоритмы машинного обучения могли анализировать семантическую близость различных киберугроз, текст необходимо перевести в математическое представление. Для решения этой задачи применяются методы обработки естественного языка (*Natural Language Processing, NLP*). В простейшем случае используется мера *TF-IDF* (*Term Frequency - Inverse Document Frequency*), позволяющая выделить наиболее значимые архитектурные термины (например, «*buffer overflow*», «*SQL injection*», «*hardcoded credentials*»). В более продвинутых реализациях метода применяются плотные векторные представления (*Word Embeddings*) на базе нейросетевых архитектур класса *Transformer* (например, модели семейства *BERT*, дообученные на корпусах текстов по кибербезопасности). В результате каждое текстовое описание транслируется в числовой вектор фиксированной размерности, отражающий семантическую суть уязвимости.

Второй этап – построение единого многомерного признакового пространства. Полученные на предыдущем шаге текстовые векторы (отражающие причину ошибки) конкатенируются с нормализованными векторами метрик *CVSS* (отражающими сложность эксплуатации и тяжесть последствий). Образуется единое многомерное пространство признаков. В этом пространстве каждая уязвимость представляет собой точку. Уязвимости, имеющие схожие архитектурные причины, требующие одинаковых привилегий для эксплуатации и вызывающие сопоставимый ущерб, будут располагаться в этом пространстве близко друг к другу.

Заключительным, третьим этапом является алгоритмическая кластеризация. Для автоматического выявления плотных скоплений точек в сформированном многомерном пространстве применяются алгоритмы кластеризации. В контексте анализа баз данных уязвимостей высокую эффективность демонстрируют алгоритмы, основанные на плотности, такие как *DBSCAN* (*Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise*) или *HDBSCAN*.

Выбор плотностных алгоритмов обусловлен их способностью находить кластеры произвольной формы и автоматически отфильтровывать статистический шум (аномальные или единичные, нетипичные уязвимости, которые не должны искажать глобальную статистику). В качестве альтернативы, при необходимости задать жесткое количество искомых профилей, может применяться алгоритм K-Means с предварительным снижением размерности методами *PCA* или *t-SNE*.

В результате выполнения процедуры кластеризации исходный массив из сотен тысяч разрозненных *CVE* разбивается на ограниченное число непересекающихся групп. Каждый сформированный кластер C_j математически описывается своим «центроидом» – усредненным вектором признаков, отражающим наиболее типичные характеристики всех вошедших в него уязвимостей.

Именно этот центроид кластера, дополненный списком наиболее частотных семантических маркеров (ключевых слов) и усредненным вектором *CVSS*, в рамках предлагаемого подхода формализуется как «профиль уязвимости». Данный профиль становится строго параметризованным объектом, готовым к дальнейшим вероятностным расчетам.

Выделенные на этапе алгоритмической кластеризации плотные скопления инцидентов представляют собой семантически и метрически однородные группы киберугроз. Однако для использования этих данных в инженерных расчетах и предиктивной аналитике требуется строгая математическая формализация. Каждый кластер C_j (где $j = 1, 2, \dots, N$) трансформируется в эталонный «профиль уязвимости» путем вычисления двух ключевых количественных характеристик: статистической вероятности возникновения и усредненного веса тяжести последствий.

Важно отметить, что формирование профилей осуществляется не для всего глобального массива данных, а таргетированно – для конкретных стеков технологий S. Это обусловлено тем, что ландшафт угроз для облачного сервера и полевого сенсора принципиально различен.

Вероятность появления конкретного профиля уязвимости в заданном стеке технологий вычисляется на основе ретроспективной частоты. На базе закона больших чисел мы принимаем историческую частоту за статистическую вероятность будущего события.
Для заданного анализируемого стека S вероятность *j*-го профиля вычисляется по формуле:

$$p_j = \frac{n_j}{N_{total}},$$

где n_j – количество уязвимостей, принадлежащих кластеру C_j, которые затрагивают программные компоненты целевого стека S; N_{total} – общее количество уязвимостей в целевом стеке S, обнаруженных за репрезентативный ретроспективный период (например, за последние 5 лет).

При этом должно строго выполняться условие нормировки: сумма вероятностей всех выделенных профилей для конкретного стека равна единице ($\sum_{j=1}^{N} p_j = 1$). Данный показатель p_j отражает стохастическую предрасположенность выбранной архитектуры к уязвимостям определенного класса.
Вторым фундаментальным параметром профиля является его потенциальный разрушительный потенциал (вес). Так как каждый кластер содержит множество близких, но не идентичных уязвимостей, вес профиля вычисляется как усредненное значение нормализованных метрик тяжести всех вошедших в него инцидентов. В контексте современных подходов к оценке безопасности целесообразно использовать метрики стандарта *CVSS* 4.0. Для каждой уязвимости i внутри кластера вычисляется скалярный вес $w_i \in [0; 1]$. Способ конвертации метрик *CVSS* в скалярный вес зависит от предметной области. Например, для сегмента киберфизических систем наивысший приоритет получают профили, нарушающие метрики доступности уязвимой (*VA*) и последующих систем (*SA*), а также не поддающиеся автоматическому восстановлению (*Recovery*). Усредненный вес профиля вычисляется как среднее арифметическое (или медианное значение для исключения влияния статистических выбросов внутри кластера):

$$W_j = \frac{1}{n_j}\sum_{i=1}^{n_j} w_i.$$

Синтезируя результаты анализа текста, метрической кластеризации и статистических расчетов, мы можем формально определить «Профиль уязвимости» (PF_j) как упорядоченный кортеж:

$$PF_j = \langle K_j, \overline{V}_j, p_j, W_j \rangle,$$

где K_j – вектор ключевых семантических маркеров, извлеченный центроид кластера на этапе *NLP*; $\overline{V}_j$ – усредненный категориальный вектор метрик *CVSS* (наиболее типичный сценарий эксплуатации); p_j – вычисленная статистическая вероятность возникновения; W_j – вычисленный ожидаемый вес тяжести последствий.

Именно этот формализованный набор параметров делает профиль уязвимости самодостаточным, отчуждаемым и переиспользуемым объектом. Он позволяет исследователям оперировать не хаотичным потоком ежедневных отчетов об ошибках, а конечным набором типизированных математических сущностей, описывающих глобальные тренды безопасности для выбранной архитектуры объекта защиты.
Научная новизна представленного подхода состоит в формировании на основе гетерогенных ретроспективных данных достоверных оценок вероятности появления конкретного профиля уязвимости и его потенциального разрушительного потенциала в заданном стеке технологий, применяемых на объекте защиты. В условиях недостаточной оперативности существующих способов реактивной аналитики угроз такие научно-методические инструменты способствуют проактивному инженерному проектированию объектов защиты. Полученный набор формализованных профилей выступает в качестве объективного эмпирического фундамента для параметризации стохастических математических моделей.
Практическая ценность предложенной методики заключается в автоматизации формирования профилей уязвимости на современном уровне развития интеллектуальных технологий обработки больших массивов гетерогенных данных.
Перспективным направлением совершенствования представленного инструментария является разработка научно-методического аппарата оценки потенциальных (предельных) характеристик защищенности киберфизических объектов. В современной теории надежности программно-аппаратных комплексов активно развивается подход, при котором устойчивость рассматривается как непрерывный процесс функциональной деградации барьерных свойств системы $D(t)$. Аналогичный подход с учетом представленной выше методики целесообразно распространить на свойство кибернетической безопасности. Динамика информационного старения в таких моделях также будет описываться экспоненциальными законами, зависящими от интенсивности потока угроз λ.

Однако для того, чтобы математическая модель деградации адекватно отражала реальность, параметр интенсивности должен учитывать не только частоту публикации уязвимостей, но и их архитектурную тяжесть (разрушительный потенциал). Именно здесь результаты профилирования находят свое прямое применение.
Имея для выбранного стека технологий набор из N выделенных профилей уязвимостей (PF_j), каждый из которых обладает вычисленной статистической вероятностью p_j и нормализованным весом тяжести W_j, имеется возможность вычислить математическое ожидание ущерба от одной случайной угрозы:

$$\overline{W} = \sum_{j=1}^{N}(p_j \cdot W_j).$$

Подстановка эмпирически полученных значений p_j и W_j в данное уравнение решает главную проблему предиктивной безопасности – параметрическую неопределенность. Вместо использования субъективных экспертных оценок, системный архитектор оперирует объективными метриками, извлеченными из анализа сотен тысяч реальных исторических инцидентов.

Дальнейшее использование вычисленного математического ожидания $\overline{W}$ позволяет определить общую ожидаемую интенсивность деградации системы:

$$\lambda_{\text{exp}} = \nu \cdot \overline{\text{W}},$$

где ν – средняя частота выявления новых уязвимостей в анализируемом технологическом стеке за единицу времени.

Использование полученной интенсивности λ_{exp} в дифференциальных уравнениях надежности позволяет строить высокоточные графики прогнозируемого падения защищенности $D(t)$. Более того, применение аппарата дисперсии к базовым профилям дает возможность математически обосновать границы доверительных интервалов – оптимистичный и пессимистичный сценарии старения («воронку неопределенности»).
Таким образом, разработанная методика нормализации и кластеризации ретроспективных баз данных (*NVD*, БДУ ФСТЭК) предоставляет инженерам и аналитикам *SOC* достоверные количественные параметры. Эти параметры могут быть напрямую интегрированы в системы автоматизированного проектирования для расчета барьерных функций надежности, прогнозирования времени до критического отказа систем и риск-ориентированного планирования технологических окон для патч-менеджмента.
В представленной статье решена актуальная научно-практическая задача систематизации и интеллектуальной обработки ретроспективных массивов данных об угрозах информационной безопасности. Доказано, что глобальные базы уязвимостей (*NVD*, БДУ ФСТЭК России), несмотря на свою изначальную гетерогенность и неполноту, могут служить надежным эмпирическим фундаментом для параметризации предиктивных риск-моделей при условии применения соответствующих алгоритмов предварительной нормализации.
Разработанный комплексный подход профилирования позволяет осуществить качественный переход от хаотичного реактивного мониторинга единичных инцидентов к прогнозированию на макроуровне. Применение методов обработки естественного языка в синергии с плотностными алгоритмами машинного обучения обеспечило возможность трансформации сотен тысяч разрозненных текстовых отчетов и устаревших метрик в ограниченный набор формализованных математических сущностей - эталонных профилей уязвимостей.
Вычисление для каждого выделенного профиля статистической вероятности возникновения (p_j) и усредненного показателя тяжести (W_j) на базе современного стандартов *CVSS* решает фундаментальную проблему неопределенности в теории надежности программно-аппаратных систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложенная методика интеллектуального анализа данных формирует объективную количественную базу для построения стохастических моделей деградации барьерных функций. Внедрение разработанных алгоритмов профилирования открывает новые перспективы для автоматизации процессов безопасного проектирования в системах класса САПР, а также для перехода центров мониторинга на проактивное риск-ориентированное планирование патч-менеджмента и технического обслуживания критической инфраструктуры.

Направлениями дальнейших исследований целесообразно считать:

- разработку имитационной модели, базирующейся на выделенном множестве источников исходных данных и обеспечивающей проверку точности, чувствительности и устойчивости предложенного научно-методического инструментария;

- разработку алгоритмов прогнозирования профилей уязвимости и оптимизации характеристик защищенности критически важных киберфизических объектов для различных стеков применяемых технологий.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Баранов А. П., Бочков М. В. Методика адаптивной оценки критичности уязвимостей в автоматизированных системах управления // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2022. – № 3. – С. 15–23.

[2] Лукацкий А. В. Риск-ориентированное управление уязвимостями: от CVSS к реальным приоритетам // Вопросы защиты информации. – 2020. – № 4. – С. 12–18.

[3] Костров Д. В., Смирнов А. А. Оценка эффективности систем защиты информации в государственных информационных системах на основе риск-ориентированного подхода // Информация и безопасность. – 2023. – Т. 26, № 2. – С. 189–198.

[4] Гайдай, А.А. Непрерывный контроль процесса достижения цели / А.А. Гайдай, И.Б. Руссман // Управление большими системами: сб. трудов. – 2004. – № 7. – С. 106–113.

[5] Саитов И.А., Кунин Н.Т., Пиун П.В. Подход к оценке эффективности государственных информационных систем на базе развития метода траекторного анализа // IV ежегодная национальная научно-практическая конференция «Цифровизация правосудия: проблемы и перспективы». – 11-18 декабря 2025 г. – М., 2025. – 11 с.

[6] Гавдан Г. П. Управление безопасностью государственных информационных систем как объектов критической информационной инфраструктуры / Г. П. Гавдан, А. А. Голубев, А. Г. Голубев, И. Ю. Жуков, Э. П. Рыбалко // Безопасность информационных технологий (BIT) / Техническая безопасность. – 2025. – № 3. – С. 23–30.

[7] Шадский В. В., Сизоненко А. Б., Чекмарёв М. А., Шишков А. В., Исакин Д. А. Исследование способов векторизации неструктурируемых текстовых документов на естественном языке по степени их влияния на качество работы различных классификаторов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2022. – Т. 22, № 1. – С. 114–119. – DOI: 10.17586/2226-1494-2022-22-1-114-119.

[8] Кравченко Ю. А., Мансур А. М. Векторизация текста с использованием методов интеллектуального анализа данных // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021.

[9] Kulkarni O. S. A Survey of Advancements in DBSCAN Clustering Algorithms for Big Data // 2024. – P. 106–111.

METHODOLOGY FOR DEVELOPING VULNERABILITY PROFILES OF PROTECTED OBJECTS BASED ON HISTORICAL DATA

I.A. Saitov, N.T. Kunin

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “MIREA – Russian Technological University”, Moscow, Russia, saitov_i@mirea.ru

Abstract: ensuring predictive cybersecurity for modern software and hardware protected objects requires a shift from qualitative threat assessments to rigorous quantitative models. A relevant scientific and technical challenge in parameterizing such models is determining the statistical probabilities and expected damage from future cyberattacks. This paper proposes a comprehensive methodology for developing “vulnerability profiles” based on the intelligent analysis of historical data from global and national databases. The main focus of the work is on methods for collecting, cleaning, and statistically clustering accumulated datasets of vulnerabilities. The study describes an algorithm for translating disparate metrics into standardized vectors, as well as the application of machine learning methods to group hundreds of thousands of incidents into a limited set of typified profiles. For each generated profile, the statistical probability of occurrence within a given technology stack and the expected severity weight of the consequences are calculated. The results of applying the proposed profiling tools provide researchers and system architects with reliable empirical data that can be directly used as input parameters for stochastic risk models, calculation of reliability barrier functions, and automation of predictive patch management.

Keywords: predictive security, vulnerability profile, retrospective analysis, data mining, threat clustering, vulnerability databases, statistical probability assessment.

УДК 004.934:004.032.26

ОБНАРУЖЕНИЕ СИНТЕЗИРОВАННОЙ РЕЧИ НА ОСНОВЕ МЕЛ-КЕПСТРАЛЬНЫХ ПРИЗНАКОВ И УЛЬТРАЛЕГКОВЕСНОЙ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Малькевич К.Д., Свиридчук И.Л.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, malkevichkirill@myrambler.ru

Аннотация: рассмотрена задача акустического анти-спуфинга – обнаружения синтезированной и конвертированной речи в системах голосовой биометрии. Реализован конвейер обработки сигнала: предыскажение, кадрирование окном Хэмминга 25 мс с шагом 10 мс, вычисление 13 мел-частотных кепстральных коэффициентов и их первых и вторых производных (вектор признаков размерности 39) и классификация сверточной нейронной сетью. Особенность архитектуры – предельно малое число обучаемых параметров, 9 986 (около 0,04 МБ), достигнутое за счет одного сверточного слоя и адаптивного усредняющего пулинга. На данных формата ASVspoof 2019 LA получены EER 10,68 % и min t-DCF 0,116 при обучении и инференсе на центральном процессоре.

Ключевые слова: анти-спуфинг, синтезированная речь, MFCC, сверточная нейронная сеть, ASVspoof 2019, EER, t-DCF.

I. ВВЕДЕНИЕ

Системы автоматической верификации диктора (Automatic Speaker Verification, ASV) применяются в дистанционном банковском обслуживании, контакт-центрах и системах контроля доступа. Развитие моделей синтеза речи по тексту (Text-to-Speech, TTS) и конверсии голоса (Voice Conversion, VC) привело к тому, что искусственно сформированный сигнал перестал отличаться от естественного на слух, а голосовая биометрия оказалась уязвимой для спуфинг-атак [1].

Для противодействия им перед модулем ASV размещается детектор подлинности (countermeasure), решающий задачу бинарной классификации «естественная речь (bona fide) – подделка (spoof)». Эталонной базой для оценки детекторов служит корпус ASVspoof 2019, подкорпус Logical Access которого содержит записи, сформированные девятнадцатью алгоритмами TTS и VC [2]. Детекторы, работающие непосредственно с сырой звуковой волной, обеспечивают высокую точность, однако содержат миллионы обучаемых параметров и ориентированы на графические ускорители [3].

Цель работы – построение и экспериментальная проверка детектора синтезированной речи, сохраняющего приемлемую точность при предельно малом числе обучаемых параметров и допускающего обучение и инференс на центральном процессоре, что открывает возможность его встраивания в мобильные и граничные вычислители.

II. ИЗВЛЕЧЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ

a. Физические предпосылки

Согласно линейной акустической теории речеобразования (модель «источник – фильтр») [4] спектр речевого сигнала описывается произведением трех независимых составляющих:

$$P(f) = S(f)V(f)R(f), \quad (1)$$

где $S(f)$ – спектр голосового источника; $V(f)$ – передаточная функция речевого тракта; $R(f)$ – характеристика излучения звука изо рта.

Генеративные модели воспроизводят это соотношение приближенно. Минимизация среднеквадратичной ошибки при обучении акустической модели приводит к эффекту излишнего сглаживания (oversmoothing): формантные траектории синтезированной речи лишены микронестабильности голосовых связок (джиттера и шиммера). Вторая группа артефактов порождается вокодером при восстановлении фазы и проявляется как периодические всплески энергии выше 4 кГц и микроразрывы на стыках кадров (рисунок 1). Эти аномалии, незаметные на слух, и служат признаками для классификатора.

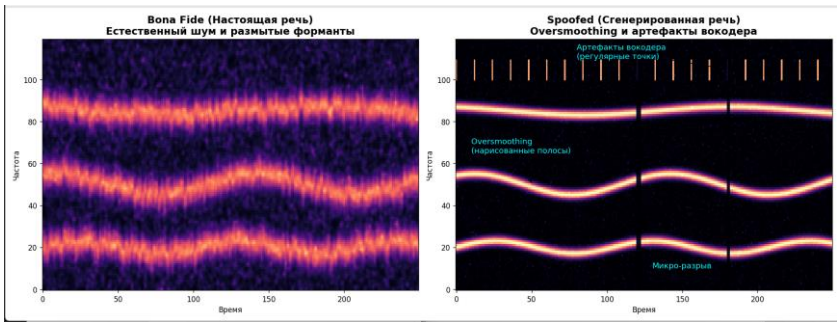


Рисунок 1. Схематическое сопоставление спектрограмм естественной и синтезированной речи

б. Конвейер вычисления признаков

Частота дискретизации записей корпуса составляет 16 кГц, что по теореме Котельникова – Найквиста ограничивает анализируемый диапазон значением 8 кГц и полностью покрывает область речевых формант. Обработка начинается с предыскажения – фильтрации верхних частот, компенсирующей естественный спад спектра речи около 6 дБ на октаву:

$$y[n] = x[n] - \alpha x[n-1], \tag{2}$$

где α = 0,97 – коэффициент предыскажения.

Далее сигнал разбивается на кадры длительностью 25 мс (400 отсчетов) с шагом 10 мс: на таком интервале речевой тракт не успевает изменить форму, а перекрытие кадров исключает потерю информации на их стыках. Чтобы разрыв сигнала на границах кадра не порождал ложных высоких частот (растекание спектра), кадр умножается на окно Хэмминга:

$$w[n] = 0{,}54 - 0{,}46\cos\frac{2\pi n}{N-1}, \tag{3}$$

где n – номер отсчета; N – длина кадра в отсчетах.

Спектр мощности кадра, полученный оконным преобразованием Фурье, пропускается через банк из 40 треугольных фильтров, центры которых расставлены равномерно по шкале мелов:

$$m = 2595\lg\left(1 + \frac{f}{700}\right). \tag{4}$$

Нелинейность шкалы воспроизводит неравномерность критических полос слуха: низкочастотная область анализируется детально, высокочастотная усредняется, что дополнительно снижает размерность данных. Логарифмирование энергий в полосах переводит мультипликативную модель (1) в аддитивную и разделяет вклады источника и фильтра, а дискретное косинусное преобразование устраняет корреляцию соседних полос [5]:

$$\mathrm{C_n} = \sum_{j=1}^{M} \lg \mathrm{E_j} \cos\left[\frac{\pi n(j-0{,}5)}{M}\right], \tag{5}$$

где M = 40 – число мел-фильтров; E_j – энергия в j-м фильтре; n – номер кепстрального коэффициента.

Используются первые 13 коэффициентов, описывающие плавную огибающую спектра, то есть геометрию речевого тракта. Поскольку естественность речи проявляется прежде всего в динамике артикуляции, к статическим коэффициентам добавляются их первые (Δ) и вторые (ΔΔ) производные по времени, вычисляемые методом линейной регрессии по соседним кадрам. Описанием кадра служит вектор размерности 39, а записи в целом – матрица 39 × T, где T – число кадров (рисунок 2).

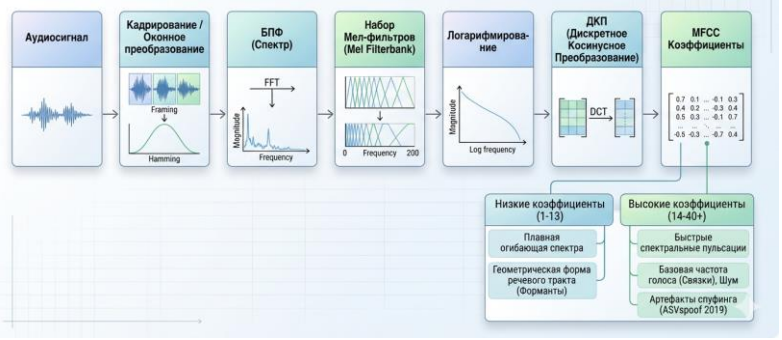


Рисунок 2. Конвейер вычисления мел-частотных кепстральных коэффициентов

III. АРХИТЕКТУРА КЛАССИФИКАТОРА

Матрица признаков рассматривается как одноканальное изображение, поэтому классификатором выбрана двумерная сверточная сеть. В отличие от полносвязной сети, которая требует развертывания матрицы в вектор и теряет локальный контекст «частота – время», свертка сохраняет взаимное расположение признаков, а разделение весов между позициями ядра сокращает число параметров на несколько порядков и обеспечивает инвариантность к сдвигу: артефакт вокодера обнаруживается независимо от момента его появления.

Сеть AntiSpoofCNN (рисунок 3) содержит один сверточный слой из 16 фильтров с ядром 3 × 3 и дополнением границ, слой подвыборки по максимуму с окном 2 × 2, адаптивный усредняющий пулинг и двухслойный полносвязный классификатор; функция активации – ReLU. Адаптивный пулинг приводит карты признаков произвольной длины к вектору размерности 304, что позволяет подавать на вход записи любой длительности без дополнения нулями.

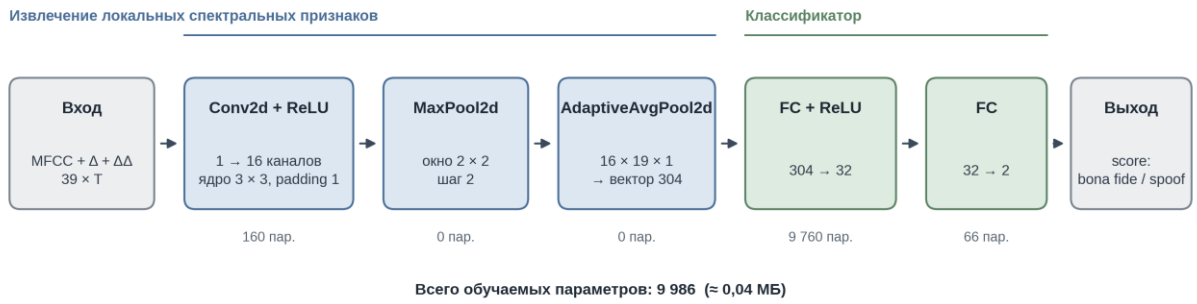


Рисунок 3. Архитектура сети AntiSpoofCNN и распределение обучаемых параметров по слоям

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Обучение проводилось на данных формата ASVspoof 2019 LA методом Adam (скорость обучения 0,001, размер пакета 16, функция потерь Cross-Entropy); тестирование выполнялось на отложенной выборке. Равная вероятность ошибок (Equal Error Rate, EER) отвечает порогу, при котором доля пропущенных подделок совпадает с долей ошибочно заблокированных дикторов, а минимальная тандемная функция стоимости обнаружения (min t-DCF) учитывает различную цену этих ошибок и ошибки самой системы верификации диктора, работающей в тандеме с детектором [6]. Условия эксперимента и результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры модели и результаты тестирования

Параметр	Значение
Признаки	MFCC (13) + Δ + ΔΔ, вектор 39
Длина кадра / шаг	25 мс / 10 мс
Число мел-фильтров	40
Обучение	Adam, lr = 0,001; пакет 16; 3 эпохи
Число обучаемых параметров	9 986 (≈ 0,04 МБ)
Вычислительное устройство	центральный процессор (CPU)
Порог принятия решения	0,0206
EER / min t-DCF	10,68 % / 0,1164

Значение EER 10,68 % уступает результатам глубоких моделей, обучаемых на полном корпусе, однако получено при числе параметров, меньшем на три порядка, и всего за три эпохи обучения, а min t-DCF 0,1164 подтверждает, что в тандеме с системой верификации диктора детектор существенно снижает суммарные издержки ошибок. Основной вклад в остаточную ошибку вносят атаки конверсии голоса, сохраняющие естественную просодию исходного диктора.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и проверен детектор синтезированной речи, объединяющий классический тракт цифровой обработки сигналов (предыскажение, кадрирование, мел-кепстральный анализ с динамическими производными) и ультралегковесную сверточную сеть из 9 986 параметров: на данных формата ASVspoof 2019 LA получены EER 10,68 % и min t-DCF 0,1164 при обучении и инференсе на центральном процессоре.

Объем модели около 0,04 МБ допускает ее размещение непосредственно во встраиваемых системах, мобильных устройствах и граничных вычислителях, где применение глубоких детекторов затруднено. Дальнейшее развитие работы предполагает расширение обучающей выборки записями с реверберацией и шумом, введение рекуррентных слоев и реализацию потоковой обработки в режиме реального времени.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы благодарят Калошу Н.И. за консультации при постановке вычислительного эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

[1] ASVspoof 2019: Future Horizons in Spoofed and Fake Audio Detection / M. Todisco [et al.] // Proc. Interspeech 2019. Graz, 2019. P. 1008–1012.

[2] ASVspoof 2019: A Large-Scale Public Database of Synthesized, Converted and Replayed Speech / X. Wang [et al.] // Computer Speech & Language. 2020. Vol. 64. Art. 101114. https://doi.org/10.1016/j.csl.2020.101114.

[3] End-to-End Anti-Spoofing with RawNet2 / H. Tak [et al.] // Proc. IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Toronto, 2021.

[4] Fant, G. Acoustic Theory of Speech Production / G. Fant. The Hague: Mouton, 1960. 323 p.

[5] Davis, S. B. Comparison of Parametric Representations for Monosyllabic Word Recognition in Continuously Spoken Sentences / S. B. Davis, P. Mermelstein // IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing. 1980. Vol. 28, No 4. P. 357–366. https://doi.org/10.1109/TASSP.1980.1163420.

[6] t-DCF: a Detection Cost Function for the Tandem Assessment of Spoofing Countermeasures and Automatic Speaker Verification / T. Kinnunen [et al.] // Proc. Odyssey 2018. Les Sables d'Olonne, 2018. P. 312–319.

DETECTION OF SYNTHESIZED SPEECH BASED ON MEL-CEPSTRAL FEATURES AND AN ULTRA-LIGHTWEIGHT CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK

K.D. Malkevich, I.L. Sviridchuk

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus,
malkevichkirill@myrambler.ru

Abstract: the paper addresses acoustic anti-spoofing – detection of synthesized and converted speech in voice biometrics. A complete pipeline is implemented: pre-emphasis, framing with a 25 ms Hamming window and a 10 ms hop, 13 mel-frequency cepstral coefficients with their first and second derivatives (a 39-dimensional feature vector), and classification by a convolutional neural network. The architecture uses only 9,986 trainable parameters (about 0.04 MB) owing to a single convolutional layer and adaptive average pooling. On ASVspoof 2019 LA formatted data an EER of 10.68 % and a min t-DCF of 0.116 were obtained, with training and inference performed on a CPU.

Keywords: anti-spoofing, synthesized speech, MFCC, convolutional neural network, ASVspoof 2019, EER, t-DCF.

УДК 681.5:004.8

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ВЫБОР ПРОГНОЗНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ МНОГОЗОННЫХ IoT-СИСТЕМ ТЕПЛОВОГО УПРАВЛЕНИЯ

Майлыханова Б.А.[1,2], Кашаганова Г.Б.[3]

[1]Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан, bulgyn.mail@gmail.com

[2]Казахский национальный аграрный исследовательский университет, Алматы, Казахстан,

[3]Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Алматы, Казахстан

Аннотация: предложена процедура автоматизированного выбора модели краткосрочного прогнозирования температуры для децентрализованного управления многозонным зданием. Процедура совместно учитывает MAE, RMSE и R^2, нормированные внутри каждой комбинации режима HVAC, зоны и горизонта. Проверка выполнена по 96 результатам для четырёх зон, двух режимов и горизонтов 15, 30 и 60 мин. Random Forest обеспечил минимальный MAE в 14 из 24 задач и минимальный интегральный критерий в 13 задачах; XGBoost выбран в 9 задачах. Полученные правила позволяют автоматически назначать модель локальному контроллеру с учётом режима и горизонта.

Ключевые слова: автоматизированный выбор модели, IoT, многозонное здание, прогнозирование, Random Forest, XGBoost.

I. ВВЕДЕНИЕ

Прогноз температуры на горизонте от нескольких минут до одного часа необходим для опережающего управления HVAC-оборудованием. В многозонной киберфизической системе единая модель не всегда обеспечивает одинаковую точность: динамика зависит от этажа, тепловой инерции зоны, наружных условий и режима нагрева или охлаждения. Поэтому задача проектирования прогнозного слоя состоит не только в обучении моделей, но и в автоматизированном назначении подходящего алгоритма каждой локальной задаче управления.

Открытый набор данных Oak Ridge National Laboratory содержит минутные измерения двухэтажного экспериментального офисного здания при различных сценариях работы HVAC [1]. Методы Random Forest [2] и XGBoost [3] широко применяются для нелинейного прогнозирования, тогда как линейная регрессия и модель постоянства позволяют оценить практический выигрыш усложнения алгоритма. Обзоры методов прогнозирования энергопотребления зданий подчёркивают зависимость качества модели от данных и режима эксплуатации [4, 5]. Однако выбор модели только по усреднённой ошибке скрывает локальные отказы и не учитывает согласованность нескольких метрик.

Цель работы – разработать воспроизводимую процедуру выбора прогнозной модели для многозонной IoT-системы на основе локально нормированного интегрального критерия. В отличие от агрегированного ранжирования, решение принимается отдельно для каждой комбинации режима HVAC, зоны и горизонта прогнозирования.

II. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходные экспериментальные результаты получены на минутных данных четырёх репрезентативных зон 102, 105, 202 и 205 для режимов охлаждения и нагрева. Для каждой зоны сформированы прогнозы на 15, 30 и 60 мин. Выборка разделена хронологически: первые 80 % наблюдений использованы для обучения, последние 20 % – для тестирования. Такое разделение исключает перенос информации из будущего в обучающую часть.

В признаки включены текущая температура и относительная влажность зоны, температура и расход приточного воздуха VAV, наружная температура и влажность, прямая, рассеянная и глобальная солнечная радиация, циклические признаки времени, а также лаги температуры 1, 5 и 15 мин. Сравнивались Persistence, Linear Regression, Random Forest и XGBoost. Для Random Forest использованы 200 деревьев и min_samples_leaf=2; XGBoost включал 200 деревьев глубиной 4 при learning_rate=0,05. Во всех стохастических процедурах random_state=42 [6].

Для каждой задачи g и модели m рассчитаны MAE, RMSE и R^2. Ошибочные метрики нормировались по диапазону среди четырёх моделей внутри одной задачи:

$$\tilde{e}_k(g,m) = [e_k(g,m) - \min_m e_k(g,m)] / [\max_m e_k(g,m) - \min_m e_k(g,m)], \quad k \in \{MAE, RMSE\}.$$

Для R^2 направление шкалы инвертировалось:

$$\tilde{r}(g,m)=[\max R^2(g,m)-R^2(g,m)]/[\max R^2(g,m)-\min R^2(g,m)].$$

Интегральная оценка $S(g,m)=(\tilde{e}MAE+\tilde{e}RMSE+\tilde{r})/3$ принимает значения от 0 до 1; меньшая величина соответствует лучшему компромиссу. Равные веса выбраны для прозрачности правила. Алгоритм автоматически назначает $\arg\min S(g,m)$, а при равенстве выбирает модель с меньшим MAE.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Всего проанализировано 96 комбинаций «режим–зона–горизонт–модель», образующих 24 локальные задачи выбора. Таблица 1 показывает устойчивость моделей на полном наборе задач. Random Forest получил наименьший средний MAE 0,0930 °C и не дал отрицательных R^2. XGBoost имел близкий средний MAE 0,0941 °C, меньший средний RMSE 0,1411 °C и максимальный MAE 0,2227 °C. У Persistence отрицательный R^2 наблюдался в семи случаях, поэтому его использование как рабочего предиктора нецелесообразно.

Таблица 1. Агрегированные показатели точности и устойчивости

Модель	MAE, °C	SD MAE	Макс. MAE	RMSE, °C	Средний R^2	$R^2<0$
Persistence	0,1303	0,0807	0,3235	0,1924	0,302	7
Linear Regression	0,1110	0,0661	0,2788	0,1565	0,581	4
Random Forest	0,0930	0,0561	0,2185	0,1460	0,671	0
XGBoost	0,0941	0,0550	0,2227	0,1411	0,672	0

Минимальный MAE был получен Random Forest в 14 из 24 задач, XGBoost – в 8, а Linear Regression и Persistence – по одному разу. После совместного учёта трёх метрик Random Forest выбран для 13 задач, XGBoost – для 9, Linear Regression – для 2; Persistence не выбран ни разу (рис. 1). Изменение победителя показывает, что минимизация только MAE и многокритериальный выбор неэквивалентны. Интегральный критерий исключает решения, у которых небольшое преимущество по одной ошибке сопровождается ухудшением RMSE или R^2.

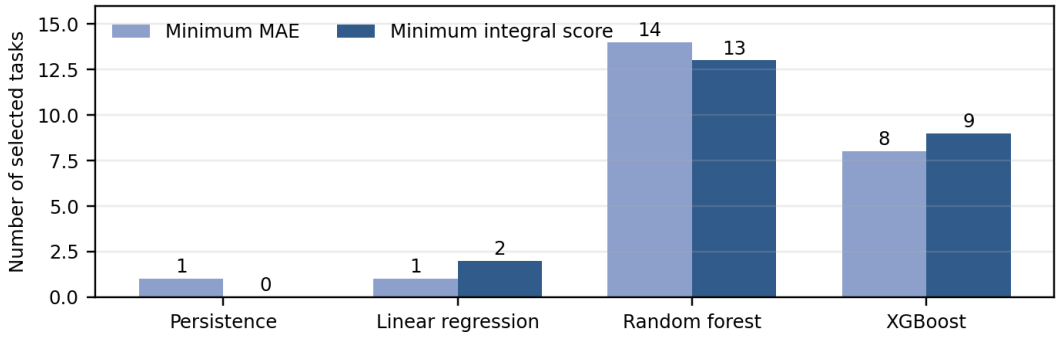


Рисунок 1. Частота автоматического выбора моделей в 24 локальных задачах

При попарном сравнении Random Forest имел меньший MAE, чем XGBoost, в 16 задачах, тогда как XGBoost – в 8. Однако преимущество зависит от горизонта. На 15 мин средние MAE практически совпали: 0,0654 °C для Random Forest и 0,0651 °C для XGBoost. На 30 мин XGBoost был лучше (0,0952 против 0,1015 °C), а на 60 мин Random Forest показал более низкую ошибку (0,1122 против 0,1222 °C). Следовательно, фиксированное назначение одной модели всем контроллерам упрощает внедрение, но не является оптимальным для каждого горизонта.

Средний MAE Random Forest составил 0,0958 °C в охлаждении и 0,0902 °C в нагреве; для XGBoost – 0,0963 и 0,0920 °C соответственно. Средний R^2 в охлаждении был около 0,49 для обеих ансамблевых моделей, а в нагреве достигал 0,848–0,851. Это различие подтверждает необходимость режимно-зависимой проверки: одинаковая абсолютная ошибка не означает одинаковую долю объяснённой изменчивости.

Предлагаемая процедура пригодна для этапа автоматизированного проектирования прогнозного слоя. После переобучения моделей система формирует таблицу метрик, нормирует их внутри локальной задачи и обновляет назначение модели. В рабочем контуре прогноз выполняет только выбранная модель, поэтому многомодельное сравнение не увеличивает постоянную вычислительную нагрузку. Практическое правило по результатам эксперимента состоит в использовании XGBoost как предпочтительного кандидата для горизонта 30 мин и Random Forest как более устойчивого кандидата для 60 мин с обязательной локальной проверкой по S.

Ограничение исследования состоит в том, что вычислительное время и объём памяти не включены в критерий, поскольку представленные результаты содержат только показатели качества прогноза. Для развёртывания на маломощных edge-устройствах оценку S следует расширить нормированными задержкой вывода и размером модели. Кроме того, пороги повторного выбора должны учитывать сезонный дрейф и накопление новых данных.

IV. ПРАКТИЧЕСКАЯ ИНТЕГРАЦИЯ ПРОЦЕДУРЫ ВЫБОРА

Автоматизированный выбор модели реализуется как отдельный модуль конфигурирования прогнозного слоя. После накопления очередного временного окна данные проверяются на пропуски и упорядочиваются по времени. Затем для каждой комбинации режима HVAC, зоны и горизонта формируются обучающая и контрольная части, рассчитываются три метрики и определяется модель с минимальной оценкой S. Результат сохраняется в таблице конфигурации, которую локальные контроллеры считывают перед выполнением прогноза.

Сравнение с моделью постоянства дополнительно показывает практический эффект применения Random Forest. Во всех шести сочетаниях режима и горизонта MAE уменьшилась. Наиболее заметное снижение получено для нагрева на горизонте 60 мин – 43,14 %, наименьшее – для нагрева на 30 мин, 4,33 %. Следовательно, преимущество нелинейной модели нельзя переносить между режимами без локальной проверки.

Таблица 2. Снижение MAE модели Random Forest относительно Persistence

Режим	Горизонт, мин	MAE Persistence, °C	MAE Random Forest, °C	Снижение MAE, %
Охлаждение	15	0,1002	0,0680	32,12
Охлаждение	30	0,1304	0,0948	27,29
Охлаждение	60	0,1807	0,1246	31,09
Нагрев	15	0,0817	0,0627	23,21
Нагрев	30	0,1132	0,1083	4,33
Нагрев	60	0,1755	0,0998	43,14

В эксплуатационном контуре повторный выбор следует выполнять по расписанию либо при обнаружении дрейфа: росте контрольной MAE, изменении режима HVAC или существенном изменении распределения входных признаков. Чтобы исключить частое переключение моделей из-за случайных колебаний метрик, новая конфигурация должна приниматься только при устойчивом улучшении на нескольких последовательных контрольных окнах. Предыдущее назначение необходимо сохранять для быстрого отката.

Для edge-реализации процедура разделяется на два контура. Обучение и сравнительная оценка выполняются на шлюзе или сервере, где доступны память и вычислительные ресурсы. Локальный контроллер получает выбранную модель, её версию, перечень признаков и допустимый диапазон входных данных. Перед активацией проверяются целостность файла модели, совместимость схемы признаков и контрольный прогноз. Такой порядок снижает нагрузку на устройство и обеспечивает воспроизводимость обновления.

Расширение критерия для промышленного применения должно учитывать задержку вывода, объём памяти и энергозатраты. Эти показатели нормируются внутри той же локальной задачи и включаются в S с весами, определяемыми требованиями контроллера. При ограничении по времени сначала исключаются модели, не удовлетворяющие предельной задержке, после чего среди допустимых вариантов выбирается решение с минимальной интегральной оценкой качества.

Перед вводом выбранной модели в эксплуатацию рекомендуется проводить теневую проверку без воздействия на управляющий сигнал. В течение контрольного периода новая и действующая модели параллельно формируют прогнозы, а система регистрирует MAE, RMSE, R^2 и долю пропущенных вычислений. Замена допускается, если новая модель сохраняет преимущество для требуемого горизонта и не нарушает ограничения по времени отклика. Такой протокол отделяет статистический выигрыш на исторической выборке от пригодности модели в реальном контуре управления.

Отдельной обработки требуют нештатные ситуации. При пропуске входного признака контроллер может использовать последнее корректное значение только в пределах заранее установленного интервала; после его превышения следует перейти к безопасному базовому алгоритму. Выход температуры или расхода воздуха за диапазон обучающей выборки должен фиксироваться как признак дрейфа. Если контрольная ошибка превышает допустимый порог, назначение модели блокируется до повторной оценки. Журнал выбора должен содержать режим, зону, горизонт, версию данных, значения метрик и причину переключения, что обеспечивает проверяемость решения.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана процедура автоматизированного выбора краткосрочной прогнозной модели для многозонной IoT-системы теплового управления. На 24 локальных задачах Random Forest обеспечил минимальный MAE в 14 случаях и минимальную интегральную оценку в 13 случаях; XGBoost выбран по интегральному критерию в 9 случаях, Linear Regression – в 2. Ансамблевые модели не имели отрицательных R^2, тогда как базовые методы демонстрировали локальные отказы. Результаты показывают, что назначение модели должно учитывать режим HVAC, зону и горизонт, а не основываться только на общей средней ошибке. Предложенный критерий может использоваться как модуль конфигурирования прогнозного слоя децентрализованной системы управления.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Yoon Y., Jung S., Im P., Gehl A. C. Datasets of a multizone office building under different HVAC system operation scenarios // Scientific Data. 2022. Vol. 9. Art. 775. DOI: 10.1038/s41597-022-01858-6.

[2] Breiman L. Random forests // Machine Learning. 2001. Vol. 45. P. 5–32. DOI: 10.1023/A:1010933404324.

[3] Chen T., Guestrin C. XGBoost: A scalable tree boosting system // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 2016. P. 785–794. DOI: 10.1145/2939672.2939785.

[4] Amasyali K., El-Gohary N. M. A review of data-driven building energy consumption prediction studies // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 81. P. 1192–1205. DOI: 10.1016/j.rser.2017.04.095.

[5] Zhao H.-X., Magoulès F. A review on the prediction of building energy consumption // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. Vol. 16, No. 6. P. 3586–3592. DOI: 10.1016/j.rser.2012.02.049.

[6] Bergstra J., Bengio Y. Random search for hyper-parameter optimization // Journal of Machine Learning Research. 2012. Vol. 13. P. 281–305.

AUTOMATED PREDICTIVE MODEL SELECTION FOR MULTI-ZONE IoT THERMAL CONTROL SYSTEMS

B. Mailykhanova[1,2], G. Kashaganova[3]

[1]Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, bulgyn.mail@gmail.com

[2]Kazakh National Agrarian Research University, Almaty, Kazakhstan

[3]K. I. Satbayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Kazakhstan

Abstract: an automated procedure is proposed for selecting a short-term temperature prediction model for decentralized control of a multi-zone building. MAE, RMSE, and R^2 are normalized within each HVAC mode, zone, and horizon combination and combined into an integral score. The procedure was evaluated using 96 results for four zones, cooling and heating modes, and 15-, 30-, and 60-min horizons. Random Forest achieved the lowest MAE in 14 of 24 tasks and the lowest integral score in 13 tasks; XGBoost was selected in 9 tasks. The resulting rules support mode- and horizon-aware model assignment to local controllers.

Keywords: automated model selection, IoT, multi-zone building, forecasting, Random Forest, XGBoost.

УДК 519.63:556.34:004.85

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Бекиева М.

Инженерно-технологический университет Туркменистана имени Огуз хана, Ашхабад, Туркменистан, successbmb@gmail.com

Аннотация: в статье рассматривается применение вычислительных алгоритмов на основе искусственного интеллекта для моделирования движения подземных вод в неоднородных пористых средах. В качестве физической основы используется обобщённая модель Дарси-Бринкмана-Форхгеймера. Исследуются три подхода: физически-информированные нейронные сети (PINN), свёрточные нейронные сети как суррогатные модели и нейронные операторы Фурье (FNO). На модельном гидрогеологическом участке проводится сравнение с эталонным решением методом конечных элементов. Полученные результаты показывают возможность существенного сокращения времени получения решения после обучения AI-моделей при сохранении приемлемой точности восстановления поля гидравлического напора. Наибольший практический интерес методы искусственного интеллекта представляют при многовариантных расчётах, сценарном анализе и решении обратных задач.

Ключевые слова: искусственный интеллект; PINN, нейронный оператор; гидрогеологическое моделирование; машинное обучение.

I. ВВЕДЕНИЕ

Моделирование движения подземных вод является важной задачей гидрогеологии и математического моделирования. Оно применяется при исследовании водоносных горизонтов, эксплуатации водозаборов, прогнозировании изменения уровней подземных вод и оценке процессов фильтрации [4, 5, 8]. В большинстве практических задач используется закон Дарси. Однако при высокой скорости фильтрации, неоднородности проницаемости, наличии трещиноватых зон и больших градиентов давления классической модели может быть недостаточно. В таких случаях применяются расширенные модели Дарси-Бринкмана и Дарси-Бринкмана-Форхгеймера [5]. Численное решение сложных неоднородных задач методом конечных элементов, конечных разностей или конечных объёмов требует значительных вычислительных ресурсов при большом числе сценариев. Особенно это существенно для параметрической идентификации, анализа неопределённости и обратных задач. Методы искусственного интеллекта позволяют строить быстрые приближённые модели решений дифференциальных уравнений. К ним относятся PINN [1, 9], суррогатные модели на основе CNN [7, 10] и нейронные операторы, в частности FNO [3]. Цель работы – исследовать возможность применения вычислительных алгоритмов на основе искусственного интеллекта для моделирования подземных гидрогеологических систем и сопоставить их точность и вычислительную эффективность с классическим численным подходом.

II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА

Рассматривается движение несжимаемой жидкости в неоднородной пористой среде. Используем обобщённую модель Дарси-Бринкмана-Форхгеймера:

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u\right) = -\nabla p + \mu\nabla^2 u - \mu K^{-1}u - \beta\rho|u|u + f, \quad (1)$$

где u – скорость фильтрации, p – давление, ρ – плотность жидкости, μ – динамическая вязкость, K – тензор проницаемости, β – коэффициент инерционного сопротивления, f – внешние силы.

Условие неразрывности имеет вид: $\nabla \cdot u = 0$. При соответствующем выборе параметров данная модель переходит к классическому описанию фильтрации по закону Дарси [4, 5]. В рассматриваемой задаче коэффициент фильтрации распределён неоднородно. В области моделирования находятся две эксплуатационные скважины. На внешней границе задаётся гидравлический напор, а на скважинах – условия отбора воды.

Для участков с непротеканием задаётся нулевой нормальный поток. Таким образом, формируется нелинейная начально-краевая задача, для которой используются классический численный метод и нейросетевые приближения.

III. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ AI-АЛГОРИТМЫ

а. PINN

PINN представляет неизвестное решение дифференциального уравнения нейронной сетью, а её параметры определяются посредством минимизации функции потерь [1, 9]. Входными переменными могут быть координаты точки и время, а выходом – гидравлический напор и компоненты скорости. Функция потерь включает невязки физических уравнений, граничных и начальных условий, а также, при наличии, ошибки относительно наблюдений: $L = \lambda_{\square} L_{\square} + \lambda_{\beta} L_{\beta} + \lambda^{\mathrm{d}} L^{\mathrm{d}} + \lambda_0 L_0$. Такой подход позволяет объединять физическую модель и имеющиеся данные в одном вычислительном алгоритме.

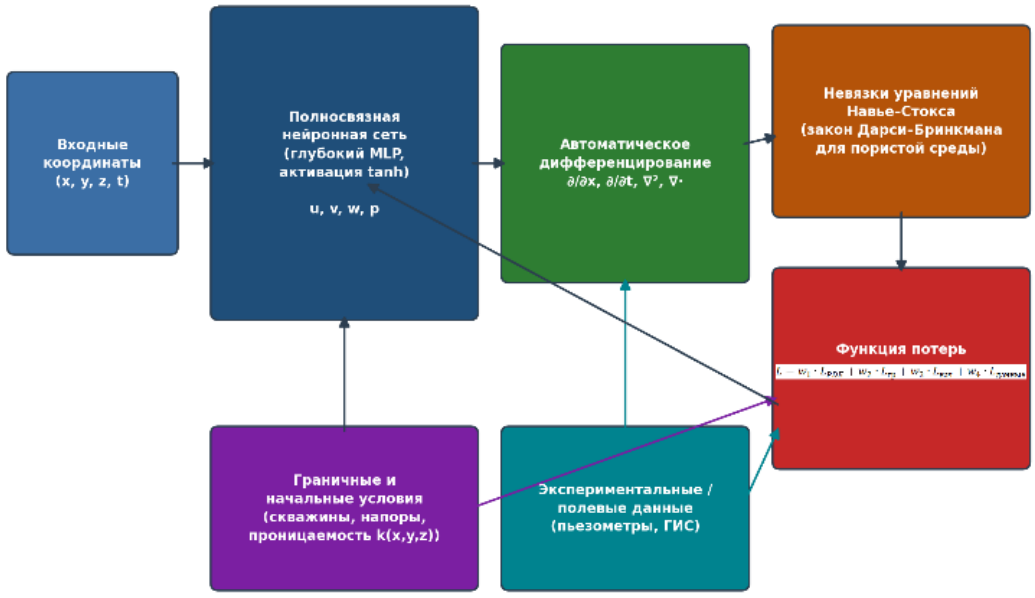


Рисунок 1. Архитектура физически-информированной нейронной сети для решения уравнений Навье-Стокса-Бринкмана в задаче подземной гидродинамики

Преимущество PINN заключается в непосредственном включении физических законов в процесс обучения. Точность метода зависит от архитектуры сети, числа точек коллокации и выбора весов функции потерь.

б. CNN-суррогат

Суррогатная модель обучается на заранее рассчитанном наборе гидрогеологических сценариев. Входом могут быть распределение коэффициента фильтрации и граничные условия, а выходом – поле гидравлического напора. Свёрточные архитектуры, например U-Net, позволяют быстро восстанавливать пространственные поля после завершения обучения. Ограничением является высокая потребность в репрезентативной обучающей выборке и снижение точности при выходе параметров за пределы обучающего диапазона [7, 10].

в. FNO

Fourier Neural Operator аппроксимирует оператор, связывающий параметры задачи с полем решения [3]. Для гидрогеологического моделирования такое отображение может быть представлено как $\{K(x), BC, \text{источники}\} \rightarrow h(x)$, где $K(x)$ – пространственное распределение проницаемости, BC – граничные условия, $h(x)$ – гидравлический напор. После обучения FNO позволяет быстро получать решения для новых сценариев в пределах области параметров обучающей выборки.

IV. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Для сравнительного анализа выбран модельный участок размером 1000 × 600 м с двумя эксплуатационными скважинами. Коэффициент фильтрации изменяется в диапазоне 5-40 м/сут. На внешней границе задаются постоянные значения гидравлического напора. Эталонное решение получено методом конечных элементов на неструктурированной сетке примерно из 42000 узлов. На его основе сформированы три AI-модели: PINN, CNN-суррогат и FNO. Для PINN использована сеть с восемью скрытыми слоями по 128 нейронов с функцией активации tanh. Обучение проводилось с использованием Adam и L-BFGS, общее число итераций 20000.

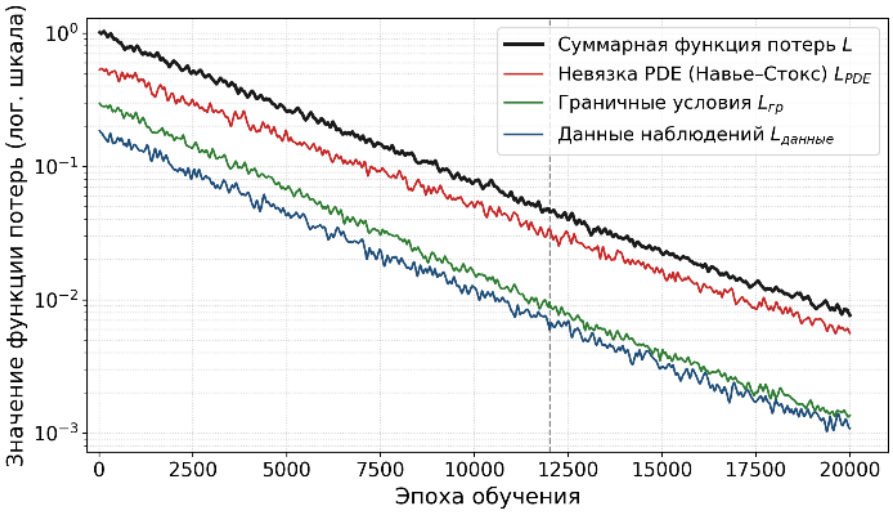


Рисунок 2. Динамика изменения функции потерь при обучении PINN-модели

Точность оценивалась по среднеквадратичной ошибке:

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{N}\right)\sum\left(h_i - \hat{h}_i\right)^2}. \quad (2)$$

Сравнение эталонного поля и результата PINN показано на рисунке 3.

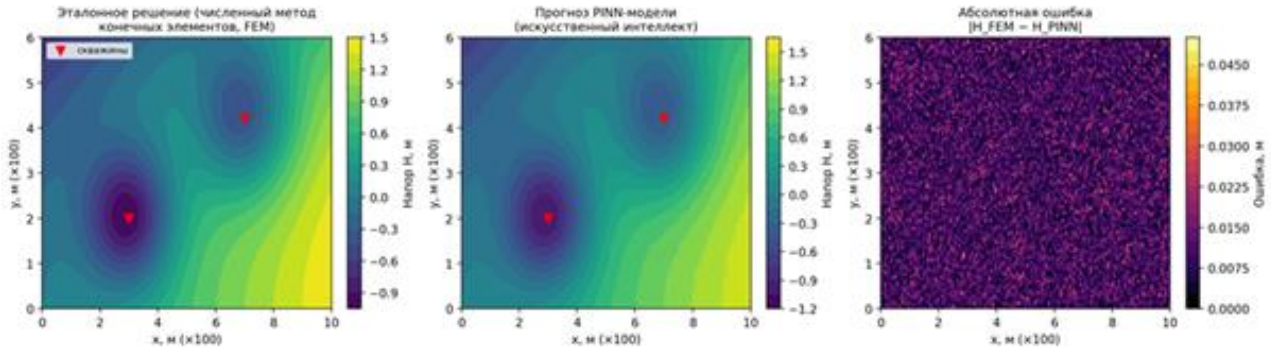


Рисунок 3. Сравнение эталонного поля гидравлического напора, результата PINN и распределения абсолютной погрешности

Наибольшие локальные ошибки наблюдаются вблизи эксплуатационных скважин и в областях с большими градиентами гидравлического напора.

Таблица 1. Сравнение вычислительных методов

Метод	Тип модели	RMSE, м	Время расчёта	Требования к данным
МКЭ	Численный, сеточный	0	Минуты, часы	низкие
PINN	Физически-информированная НС	0,041	секунды (после обучения)	средние
CNN-суррогат	Сверточная НС (обучение на данных)	0,067	доли секунды	высокие
FNO	Нейронный оператор	0,038	доли секунды	высокие

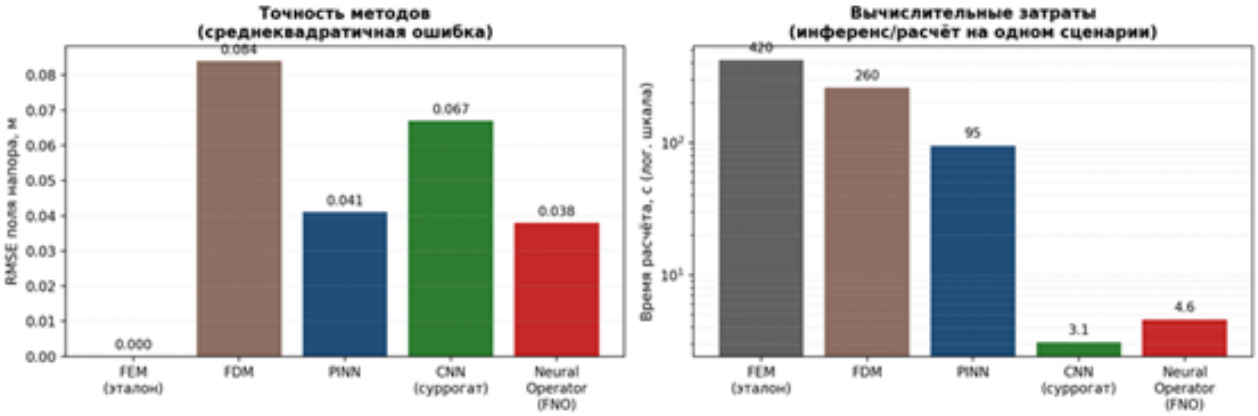


Рисунок 4. Сравнение точности и вычислительных затрат рассматриваемых методов

Полученные в модельном эксперименте значения RMSE для PINN и FNO составляют 0,041 и 0,038 м соответственно. CNN-суррогат показывает более высокую ошибку – 0,067 м, но обеспечивает очень быстрый инференс. Следует учитывать, что преимущество AI-методов проявляется главным образом после завершения обучения. Поэтому при однократном расчёте полный численный метод может оставаться конкурентоспособным, тогда как при большом числе сценариев вычислительный выигрыш нейронных моделей становится более значимым.

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

PINN представляет интерес для гидрогеологических задач благодаря возможности включать физические уравнения непосредственно в функцию потерь. Это особенно важно при ограниченном количестве наблюдений [1, 6, 9]. CNN-суррогаты отличаются высокой скоростью получения решения, однако требуют большого объёма качественных обучающих данных. FNO ориентирован на аппроксимацию оператора решения и поэтому особенно интересен для многосценарного моделирования [3]. Сложными участками остаются зоны около скважин и области с резкими изменениями проницаемости. Одним из перспективных решений является создание гибридных схем, в которых классический численный метод применяется в сложных локальных областях, а нейросетевая модель в остальных частях расчётной области. Таким образом, искусственный интеллект целесообразно рассматривать не как полную замену классическим численным методам, а как инструмент их дополнения. Классические модели могут использоваться для получения эталонных решений и формирования обучающих выборок, а AI-модели для ускорения многовариантных расчётов; распространение подхода на трёхмерные многослойные системы с учётом массопереноса.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены PINN, CNN-суррогат и FNO для моделирования подземных гидрогеологических систем. Проведено их сопоставление с эталонным решением методом конечных элементов на модельном участке с двумя эксплуатационными скважинами и неоднородным коэффициентом фильтрации. В рассматриваемом вычислительном эксперименте PINN и FNO обеспечили RMSE порядка 0,038-0,041 м, а время последующего получения решения оказалось существенно меньше времени полного численного расчёта. Результаты показывают перспективность AI-подходов прежде всего для многосценарного моделирования, параметрической идентификации, анализа неопределённости и построения систем поддержки принятия решений. Дальнейшие исследования целесообразно направить на гибридные численно-нейросетевые методы, повышение устойчивости вблизи скважин и переход к трёхмерным многослойным системам.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Raissi, M., Perdikaris, P., Karniadakis, G. E. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations // Journal of Computational Physics, Vol. 378, 2019, P. 686–707.

[2] Lu, L., Jin, P., Pang, G., Zhang, Z., Karniadakis, G. E. Learning nonlinear operators via DeepONet based on the universal approximation theorem of operators // Nature Machine Intelligence, Vol. 3, 2021, P. 218–229.

[3] Li, Z., Kovachki, N., Azizzadenesheli, K. et al. Fourier Neural Operator for Parametric Partial Differential Equations / arXiv preprint, 2020. https://arxiv.org/abs/2010.08895

[4] Полубаринова-Кочина, П. Я. Теория движения грунтовых вод // Наука, 1977, 664 с.

[5] Bear, J. Dynamics of Fluids in Porous Media // Dover Publications, 1988, 764 p.

[6] Tartakovsky, A. M., Marrero, C. O., Perdikaris, P. et al. Physics-informed deep neural networks for learning parameters and constitutive relationships in subsurface flow problems // Water Resources Research, Vol. 56, № 5, 2020.

[7] Zhu, Y., Zabaras, N., Koutsourelakis, P.-S., Perdikaris, P. Physics-constrained deep learning for high-dimensional surrogate modeling and uncertainty quantification without labeled data // Journal of Computational Physics, Vol. 394, 2019, P. 56-81.

[8] Мироненко, В. А. Динамика подземных вод: учебник // Изд-во МГГУ, 2005, 519 с.

[9] Karniadakis, G. E., Kevrekidis, I. G., Lu, L. et al. Physics-informed machine learning // Nature Reviews Physics, Vol. 3, 2021, P. 422–440.

[10] Wang, N., Chang, H., Zhang, D. Efficient uncertainty quantification for dynamic subsurface flow with surrogate by theory-guided neural network // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 373, 2021.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE-BASED COMPUTATIONAL ALGORITHMS FOR MODELING GROUNDWATER HYDROGEOLOGICAL SYSTEMS

M. Bekiyeva

Oguz han Engineering and Technology University of Turkmenistan, Ashgabat, Turkmenistan,
successbmb@gmail.com

Abstract: this article examines the application of artificial intelligence-based computational algorithms to model groundwater flow in heterogeneous porous media. The generalized Darcy-Brinkman-Forchheimer model serves as the physical basis. Three approaches are investigated: physics-informed neural networks (PINNs), convolutional neural networks acting as surrogate models, and Fourier neural operators (FNOs). A comparison with a reference solution obtained via the finite element method is conducted using a model hydrogeological site. The results demonstrate the potential to significantly reduce solution times after training the AI models while maintaining acceptable accuracy in reconstructing the hydraulic head field. Artificial intelligence methods are of particular practical interest for multi-variant calculations, scenario analysis, and the solution of inverse problems.

Keywords: artificial intelligence; PINN, neural operator; hydrogeological modeling; machine learning.

УДК 004.056.55:004.85

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ СЕТЕВЫХ АТАК В IoT-СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ LIGHTGBM

Якунин А.А., Майлыханова Б.А.

Казахский национальный аграрный исследовательский университет, Алматы, Казахстан,
andryakunin@gmail.com

Аннотация: рассмотрена задача автоматизированного обнаружения сетевых атак в инфраструктуре Интернета вещей с использованием алгоритма LightGBM. Определены особенности IoT-трафика, влияющие на построение системы обнаружения вторжений: дисбаланс классов, разнородность устройств, ограниченность вычислительных ресурсов и изменение профиля атак во времени. Предложена последовательность обработки данных, включающая очистку сетевых потоков, кодирование категориальных признаков, стратифицированное разделение выборки, настройку LightGBM и оценивание по accuracy, precision, recall, F1-score и ROC-AUC. Показано, что листовой способ роста деревьев и методы Gradient-based One-Side Sampling и Exclusive Feature Bundling делают LightGBM перспективным для анализа многомерного IoT-трафика. Сформулированы требования к экспериментальной проверке, предотвращающие завышение качества модели из-за утечки данных и дисбаланса классов.

Ключевые слова: интернет вещей, обнаружение вторжений, сетевые атаки, LightGBM, градиентный бустинг, машинное обучение.

I. ВВЕДЕНИЕ

Интернет вещей объединяет датчики, исполнительные устройства, шлюзы и информационные сервисы, обеспечивая непрерывный обмен данными и автоматическое управление. Расширение числа подключённых устройств одновременно увеличивает поверхность атаки. Компрометация узла IoT может привести к утечке данных, нарушению доступности сервиса, подмене управляющих команд и использованию устройства в составе ботнета. Особую сложность создают ограниченные ресурсы конечных устройств, неоднородность протоколов и длительный жизненный цикл оборудования.

Сигнатурные системы обнаружения вторжений эффективно распознают известные угрозы, но зависят от своевременного обновления правил. Методы машинного обучения позволяют выявлять статистические различия между нормальным и вредоносным трафиком и применяются для бинарной и многоклассовой классификации атак [1–3]. При этом высокая доля нормальных пакетов и редкость отдельных атак делают показатель accuracy недостаточным: модель может демонстрировать высокую общую точность, пропуская критические классы.

Цель работы – разработать обоснованную схему автоматизированного обнаружения атак в IoT-трафике на основе LightGBM и определить корректный протокол её экспериментальной оценки. Вклад работы состоит в согласовании этапов подготовки данных, обучения, контроля утечки и выбора метрик с особенностями IoT-среды. Работа не заявляет новые экспериментальные значения точности: окончательные показатели должны рассчитываться на выбранном открытом наборе данных по описанному протоколу.

II. УГРОЗЫ И ДАННЫЕ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ АТАК

Для сетей IoT характерны атаки отказа в обслуживании DoS/DDoS, сканирование портов, подбор учётных данных, внедрение вредоносного программного обеспечения, атаки «человек посередине» и активность ботнетов. Признаками могут служить длительность потока, количество и размер пакетов, направление соединения, число байтов, частота запросов, используемый протокол, флаги TCP и статистики временных интервалов. При проектировании модели признаки следует получать только из информации, доступной в момент принятия решения.

Для воспроизводимых исследований подходят открытые наборы Edge-IIoTset и ToN_IoT. Edge-IIoTset содержит нормальный трафик и несколько классов атак, сформированных в реалистичной IoT/IIoT-среде [4]. ToN_IoT объединяет сетевые потоки, телеметрию IoT/IIoT и журналы операционных систем [5]. Эти наборы различаются структурой и распределением классов, поэтому результаты нельзя переносить между ними без повторной проверки.

Подготовка данных включает удаление дубликатов и некорректных значений, кодирование протоколов и состояний соединения, а также разделение на train, validation и test. Кодировщики и средства

балансировки обучаются только на train-части. При этом одинаковые потоки и временно связанные записи не должны попадать одновременно в обучение и тестирование. Для деревьев решений масштабирование числовых признаков, как правило, не является обязательным.

III. МЕТОД LIGHTGBM И АРХИТЕКТУРА ОБНАРУЖЕНИЯ

LightGBM представляет собой реализацию градиентного бустинга над деревьями решений (рисунок 1). Каждое последующее дерево корректирует ошибки текущего ансамбля, а итоговая оценка формируется суммой вкладов деревьев. В отличие от симметричного роста по уровням, LightGBM выбирает лист с наибольшим потенциальным уменьшением функции потерь и расширяет его. Такой leaf-wise-подход может повысить точность при ограниченном числе листьев, но при малой выборке увеличивает риск переобучения [6-8].

Высокая вычислительная эффективность обеспечивается двумя механизмами. Gradient-based One-Side Sampling сохраняет наблюдения с большими градиентами и выбирает часть объектов с малыми градиентами. Exclusive Feature Bundling объединяет разреженные взаимно исключающие признаки. Это особенно полезно при кодировании категориальных параметров сетевого трафика, когда возникает большое число разреженных бинарных столбцов.

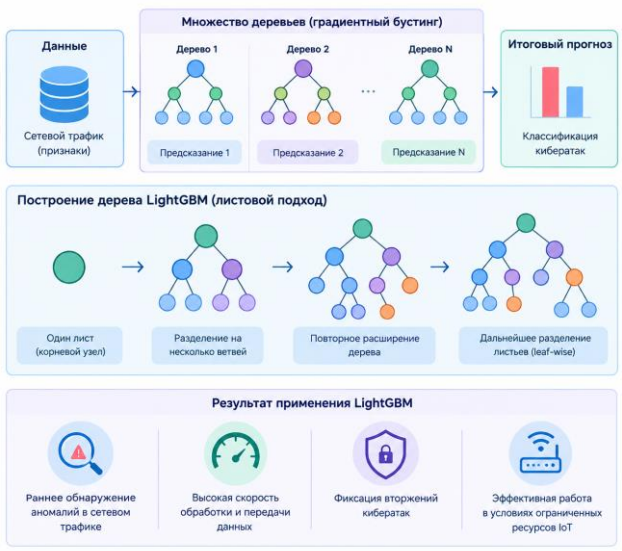


Рисунок 1. Формирование прогноза ансамблем LightGBM и листовой рост дерева

Предлагаемая архитектура состоит из пяти последовательных модулей. Модуль сбора преобразует пакеты в сетевые потоки. Модуль предобработки очищает данные и формирует признаки. Обученный классификатор LightGBM рассчитывает вероятность принадлежности потока к нормальному или атакующему классу. Модуль принятия решения сравнивает вероятность с порогом, выбранным на validation-выборке. Модуль реагирования регистрирует событие, формирует уведомление и передаёт команду системе управления безопасностью.

Таблица 1. Параметры LightGBM и их роль в контроле модели

Параметр	Влияние	Практическая рекомендация
num_leaves	Определяет сложность отдельного дерева	Уменьшать при признаках переобучения
max_depth	Ограничивает глубину дерева	Согласовывать с num_leaves
learning_rate	Задаёт вклад каждого дерева	Снижать вместе с увеличением n_estimators
min_child_samples	Минимум объектов в листе	Увеличивать для редких и шумных признаков
class_weight	Компенсирует дисбаланс классов	Рассчитывать только по train-части
feature_fraction	Доля признаков для дерева	Использовать для регуляризации

Для бинарной классификации параметры модели оптимизируются по логистической функции потерь. Для объекта i с истинной меткой $y_i \in \{0,1\}$ и прогнозом вероятности p_i функция имеет вид $L=-(1/N)\Sigma[y_i \ln(p_i)+(1-y_i)\ln(1-p_i)]$. При многоклассовой постановке используется соответствующая кросс-энтропия. Основные гиперпараметры – num_leaves, max_depth, learning_rate, n_estimators, min_child_samples, feature_fraction и bagging_fraction. Их необходимо подбирать только по validation-части или внутри кросс-валидации (таблица 1).

IV. ПРОТОКОЛ ОЦЕНКИ И ОБСУЖДЕНИЕ

Эксперимент должен начинаться с фиксации схемы разделения данных. Случайное разделение отдельных строк допустимо только при отсутствии временно связанных и повторяющихся потоков. Для потокового IoT-трафика предпочтительно хронологическое разделение: ранние наблюдения используются для обучения, последующие – для тестирования. Если одинаковые сценарии атак генерируются сериями, их следует группировать, чтобы близкие записи не оказались одновременно в обучающей и тестовой частях.

Качество бинарного детектора следует оценивать по матрице ошибок. Precision=TP/(TP+FP) характеризует долю истинных атак среди срабатываний; recall=TP/(TP+FN) показывает долю обнаруженных атак; F1=2·precision·recall/(precision+recall) объединяет обе характеристики. Дополнительно используются ROC-AUC и PR-AUC. При сильном дисбалансе PR-AUC и recall атакующего класса информативнее общей accuracy. Для многоклассовой задачи необходимо публиковать значения precision, recall и F1 для каждого класса, а также macro- и weighted-усреднение.

Сравнение LightGBM должно включать простую базовую модель, например логистическую регрессию, а также альтернативные ансамблевые методы Random Forest и XGBoost. Все модели обучаются на одном разделении данных и одном наборе признаков. Помимо качества распознавания необходимо измерять время обучения, задержку обработки одного потока, объём памяти и размер модели. Такие показатели позволяют определить, следует ли выполнять анализ на шлюзе, периферийном сервере или в облаке (таблица 2).

Таблица 2. Критерии итогового сравнения моделей

Критерий	Что показывает	Почему важен для IoT
Recall атак	Долю обнаруженных атак	Пропуск атаки может нарушить работу системы
Precision	Достоверность тревожных сообщений	Ложные тревоги перегружают оператора
Macro-F1	Баланс качества по всем классам	Учитывает редкие типы атак
PR-AUC	Качество ранжирования при дисбалансе	Устойчивее accuracy при редких атаках
Задержка	Время классификации потока	Определяет пригодность для реального времени
Память	Ресурсы модели при развёртывании	Критично для шлюзов и edge-узлов

Преимуществами LightGBM являются работа с нелинейными зависимостями, устойчивость к различным масштабам числовых признаков и высокая скорость на больших выборках. Ограничения связаны с переобучением при слишком большом числе листьев, чувствительностью к изменению распределения трафика и необходимостью повторного обучения при появлении новых устройств и атак. Следовательно, развёрнутая система должна поддерживать мониторинг дрейфа данных, журналирование ошибок и периодическую актуализацию модели.

V. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Практическое внедрение целесообразно выполнять на уровне IoT-шлюза или периферийного сервера. Конечные устройства передают телеметрию штатным способом, а шлюз формирует агрегированные признаки потока и обращается к локальному сервису классификации. Такое размещение не требует установки сложной модели на каждый датчик, уменьшает задержку по сравнению с облачной обработкой и позволяет сохранять работоспособность при временной потере внешнего соединения. В

облако могут передаваться журналы тревог, агрегированная статистика и обезличенные выборки для последующего дообучения.

Выходом классификатора должна быть не только метка, но и вероятность класса. Порог срабатывания выбирается по validation-выборке с учётом стоимости двух типов ошибок. Слишком низкий порог увеличивает число ложных тревог, а слишком высокий повышает риск пропуска атаки. Для критически важных устройств приоритет следует отдавать recall, тогда как для массового мониторинга необходимо одновременно ограничивать частоту ложных срабатываний. Решение об автоматической блокировке соединения рекомендуется принимать только для событий с высокой уверенностью; остальные события направляются оператору.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена схема автоматизированного обнаружения сетевых атак в IoT-системах на основе LightGBM. Схема охватывает формирование потоковых признаков, предотвращение утечки данных, учёт дисбаланса классов, настройку модели и многокритериальную оценку. LightGBM является перспективным алгоритмом для этой задачи благодаря листовому росту деревьев и эффективной обработке многомерных разреженных данных. Вместе с тем вывод о практическом превосходстве должен подтверждаться сравнением с базовыми моделями на едином тестовом наборе и оценкой не только точности, но и задержки и потребления памяти. Дальнейшая работа предполагает реализацию описанного протокола на Edge-IIoTset или ToN_IoT и проверку устойчивости модели к новым типам атак и изменению профиля сетевого трафика.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Бабичева М. В., Третьяков И. А. Применение методов машинного обучения для автоматизированного обнаружения сетевых вторжений // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023. Т. 50, № 1. С. 53–61.

[2] Балыбердин А. В., Крылов Г. О. Повышение точности выявления аномалий для систем обнаружения вторжения с помощью ансамблевого обучения // Безопасность информационных технологий. 2025. Т. 32, № 1. С. 153–171.

[3] Татарникова Т. М., Богданов П. Ю. Обнаружение атак в сетях Интернета вещей методами машинного обучения // Информационно-управляющие системы. 2021. № 6 (115). С. 42–52.

[4] Ferrag M. A., Friha O., Hamouda D., Maglaras L., Janicke H. Edge-IIoTset: A New Comprehensive Realistic Cyber Security Dataset of IoT and IIoT Applications for Centralized and Federated Learning // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 40281–40306. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3165809.

[5] Alsaedi A., Moustafa N., Tari Z., Mahmood A., Anwar A. TON_IoT Telemetry Dataset: A New Generation Dataset of IoT and IIoT for Data-Driven Intrusion Detection Systems // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 165130–165150. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3022862.

[6] Ke G., Meng Q., Finley T., Wang T., Chen W., Ma W., Ye Q., Liu T.-Y. LightGBM: A Highly Efficient Gradient Boosting Decision Tree // Advances in Neural Information Processing Systems. 2017. Vol. 30. P. 3146–3154.

[7] Bentéjac C., Csörgő A., Martínez-Muñoz G. A Comparative Analysis of Gradient Boosting Algorithms // Artificial Intelligence Review. 2021. Vol. 54. P. 1937–1967. DOI: 10.1007/s10462-020-09896-5.

[8] Чаругин В. В., Чесалин А. Н. Анализ и формирование наборов данных сетевого трафика для обнаружения компьютерных атак // International Journal of Open Information Technologies. 2023. Т. 11, № 6. С. 100–106.

AUTOMATED NETWORK ATTACK DETECTION IN IOT SYSTEMS USING LIGHTGBM

A. Yakunin, B. Mailykhanova

Kazakh National Agrarian Research University, Almaty, Kazakhstan, andryakunin@gmail.com

Abstract: this paper proposes a LightGBM-based workflow for automated network attack detection in IoT infrastructure. It combines flow preprocessing, stratified splitting, and evaluation by precision, recall, F1-score, ROC-AUC, and PR-AUC. The protocol addresses class imbalance and data leakage and supports deployment on an IoT gateway or edge server.

Keywords: Internet of Things; intrusion detection; LightGBM; machine learning.

UDC 004.85:004.032.26

DESIGN AND OPTIMIZATION OF A LIGHTWEIGHT MACHINE LEARNING ALGORITHM FOR REAL-TIME ANOMALY DETECTION AND FORECASTING ON RESOURCE-CONSTRAINED EDGE SENSOR SYSTEMS

Sh. Pulatov, F. Abdualimov

Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, Tashkent, Uzbekistan, shpulatov@tuit.uz

Abstract: edge and IoT sensor deployments increasingly require on-site or near-site data quality control and forecasting, yet the computing resources available at remote monitoring stations are often limited. This paper addresses the design and optimization of a lightweight machine learning pipeline that combines a rolling z-score anomaly filter with a gradient-boosted regression model for short-horizon forecasting, using continuous water-discharge monitoring in an arid region as a representative resource-constrained deployment case. The design is evaluated against persistence and ARIMA baselines using accuracy, RMSE, MAE, and inference time as joint design criteria. Results show that the proposed lightweight model attains 92.7% forecasting accuracy with an RMSE of 0.58 m3/s and an inference time of 0.46 s, outperforming both baselines in accuracy while remaining suitable for periodic retraining on modest edge-computing hardware, illustrating an effective algorithm-design strategy for resource-constrained monitoring systems.

Keywords: algorithm design and optimization, machine learning, edge computing, anomaly detection, gradient boosting, ARIMA, resource-constrained systems.

I. INTRODUCTION

As edge and IoT sensor networks scale up, there is a growing design requirement to embed data-quality control and short-horizon forecasting directly at, or close to, the sensing point, rather than relying solely on centralized processing. This raises an algorithm-design problem: the chosen model must be accurate enough to be useful for decision-making, yet computationally light enough to run and be periodically retrained on the modest hardware typically available at regional monitoring centers. This paper addresses that design problem using continuous discharge, stage, and salinity monitoring in the Aral Sea region of Uzbekistan as a representative, resource-constrained deployment case that is well suited to expose the accuracy-versus-cost trade-off central to the design.

The contribution of this paper is a lightweight algorithm design combining a low-complexity statistical anomaly filter with a gradient-boosted forecasting model, together with an evaluation methodology that treats computational cost as a first-class design criterion alongside accuracy.

II. DESIGN PROBLEM FORMULATION

Let x denote a sensor reading at time t. The algorithm design must satisfy two requirements under a limited computational budget: (1) for each new reading, decide in constant or near-constant time whether it is anomalous and should be withheld from downstream processing; (2) using upstream discharge and lagged rainfall, produce a forecast of discharge Q at a short lead time Δ for a downstream control point, at an inference cost compatible with edge or regional-center hardware.

III. ALGORITHM DESIGN

a. Lightweight anomaly-detection filter

For a rolling window of size W, the z-score of a new reading x relative to the local mean μ_W and standard deviation σ_W is computed in O(1) amortized time per sample:

$$z_t = \frac{x_t - \mu_W}{\sigma_W} \quad (1)$$

A reading is flagged when $|z_t| > z_{th}$ (typically $z_{th} = 3$); under a Gaussian null hypothesis the expected false-flag rate is:

$$P(|Z| > z_{th}) = 2(1 - \Phi(z_{th})) \quad (2)$$

where $\Phi(z_{th})$ is the standard normal CDF; this design keeps the per-sample filtering cost independent of the size of the historical record.

b. Forecasting model design

Downstream discharge at lead time Δ is expressed by the interpretable linear structure:

$$Q_{down}(t+\Delta) = \beta_0 + \beta_1 Q_{up}(t) + \beta_2 R(t-\tau) + \varepsilon(t) \quad (3)$$

in the proposed design this linear form is replaced with a gradient-boosted tree ensemble over the same feature set, chosen specifically because it offers a favorable accuracy-per-training-cost ratio and predictable, bounded inference latency compared to deeper models, which is the key design requirement for edge deployment.

c. Design evaluation metrics

Forecast quality is evaluated using RMSE and MAE over M held-out samples, while wall-clock inference time is recorded as an explicit design (resource-cost) metric alongside accuracy:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M}\Sigma(Q_i - Q_i)^2} \quad (4)$$

$$MAE = \frac{1}{M}\Sigma|Q_i - Q_i| \quad (5)$$

IV. RESULTS AND DESIGN EVALUATION

Table 1 and Fig. 1 compare the proposed lightweight design against a persistence baseline and an ARIMA model for one-hour-ahead discharge forecasts, jointly reporting accuracy, RMSE, and inference time as design criteria.

Table 1. Design comparison of forecasting methods (1-hour lead time)

Method	Accuracy, %	RMSE, m³/s	Inference time, s
Persistence (baseline)	71.4	1.86	0.01
ARIMA	84.2	1.02	0.34
Proposed (gradient boosting)	92.7	0.58	0.46

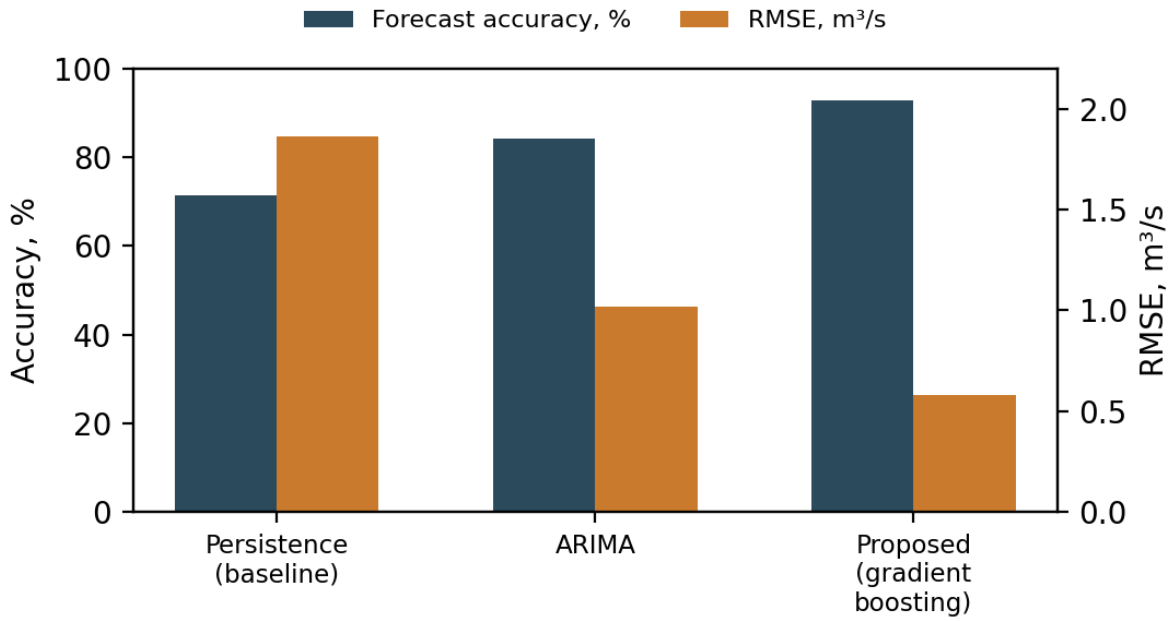


Figure 1. Forecast accuracy and RMSE for the three compared design options

The proposed design reduces RMSE by 44% relative to ARIMA and by 69% relative to persistence, at an inference cost of 0.46 s per sample, which remains well within the periodic-retraining budget available on modest regional-center hardware. The anomaly filter of equations (1)-(2) further protects the forecasting model from being trained on faulty readings caused by transient sensor faults, improving robustness at negligible additional computational cost.

V. CONCLUSION

This paper presented the design and optimization of a lightweight machine learning pipeline, combining a constant-time statistical anomaly filter with a gradient-boosted forecasting model, explicitly evaluated against both accuracy and computational-cost criteria. Using discharge forecasting for arid-region water monitoring as a representative case, the design was shown to substantially outperform persistence and ARIMA baselines in accuracy while remaining suitable for deployment on resource-constrained edge and regional-center hardware. The design methodology generalizes to other edge-AI applications where accuracy must be balanced against a limited computational budget.

ACKNOWLEDGMENT

The authors thank colleagues for their guidance during the preparation of this work.

REFERENCES

[1] Friedman, J. H. Greedy function approximation: A gradient boosting machine // Annals of Statistics. 2001. Vol. 29, No 5. P. 1189–1232.

[2] Box, G. Time Series Analysis: Forecasting and Control / G. Box, G. Jenkins, G. Reinsel, G. Ljung. 5th ed. Hoboken: Wiley, 2015.

[3] Omambia, A. Water Quality Monitoring Using IoT & Machine Learning / A. Omambia, B. Maake, A. Wambua // Proc. IST-Africa Conf. 2022.

[4] Olatinwo, S. O. Resource allocation optimization in IoT-enabled water quality monitoring systems / S. O. Olatinwo, T.-H. Joubert // University of Pretoria Institutional Repository. 2023.

[5] Pulatov, S. A Hybrid Store-and-Forward and Dynamic Channel Allocation Approach for SDN-Enabled LEO IoT Networks / S. Pulatov [et al.] // OPTIMA. 2025.

[6] Trivedi, K. Probability and Statistics with Reliability, Queuing, and Computer Science Applications. 2nd ed. Hoboken: Wiley, 2016.

[7] Water Code of the Republic of Uzbekistan. No. ZRU-1076. 30.07.2025.

[8] Mdegela, L. A Multi-Modal Wireless Sensor System for River Monitoring: A Case for Kikuletwa River Floods in Tanzania / L. Mdegela [et al.] // Sensors. 2023. Vol. 23, No 8. P. 4055.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЛЕГКОВЕСНОГО АЛГОРИТМА МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛИЙ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ НА РЕСУРСООГРАНИЧЕННЫХ ПЕРИФЕРИЙНЫХ СЕНСОРНЫХ СИСТЕМАХ

Пулатов Ш., Абдуалимов Ф.

Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада аль-Хорезми, Ташкент, Узбекистан, shpulatov@tuit.uz

Аннотация: развёртывания периферийных и IoT-сенсоров всё чаще требуют контроля качества данных и прогнозирования на месте или вблизи места установки, однако вычислительные ресурсы, доступные на удалённых станциях мониторинга, зачастую ограничены. В данной работе рассматриваются проектирование и оптимизация легковесного конвейера машинного обучения, который объединяет скользящий z-score фильтр аномалий с моделью градиентно-бустинговой регрессии для краткосрочного прогнозирования, на примере непрерывного мониторинга расхода воды в засушливом регионе как репрезентативного случая развёртывания в условиях ограниченных ресурсов. Разработанное решение оценивается в сравнении с базовыми моделями персистентности и ARIMA с использованием точности, RMSE, MAE и времени инференса в качестве совместных критериев проектирования. Результаты показывают, что предлагаемая легковесная модель достигает точности прогнозирования 92,7% при RMSE 0,58 м³/с и времени инференса 0,46 с, превосходя обе базовые модели по точности и оставаясь при этом пригодной для периодического переобучения на скромном периферийном вычислительном оборудовании, что иллюстрирует эффективную стратегию проектирования алгоритмов для систем мониторинга с ограниченными ресурсами.

Ключевые слова: проектирование и оптимизация алгоритмов, машинное обучение, периферийные вычисления, обнаружение аномалий, градиентный бустинг, ARIMA, системы с ограниченными ресурсами.

UDC 004.75:621.396

DESIGN OF A RESOURCE-CONSTRAINED IOT SENSOR NODE ARCHITECTURE WITH FAULT-TOLERANT TELEMETRY FOR ENVIRONMENTAL MONITORING SYSTEMS

Sh. Pulatov, F. Abdualimov

Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, Tashkent, Uzbekistan, abdualimovferuz1833@gmail.com

Abstract: environmental sensor networks deployed in remote, power- and connectivity-constrained locations require careful co-design of the sensing, communication, and power subsystems. This paper addresses the design and optimization of a low-power IoT sensor node architecture with fault-tolerant telemetry, using continuous water-resource monitoring in an arid region as a representative deployment case. A four-layer system architecture is proposed, and the connectivity layer is optimized using store-and-forward buffering and dynamic channel allocation adapted from SDN-enabled LEO satellite networks, reducing the design cost of achieving reliable data delivery over intermittent GSM/LoRa links. Analytical models of link availability, buffer occupancy, and solar energy budget are derived to guide design trade-offs. Simulation results show that the optimized connectivity design raises packet delivery success rate from 61.2% to 92.8% at 60% link availability, demonstrating an effective low-cost design strategy for resource-constrained edge sensing systems.

Keywords: embedded system design, IoT sensor node, design optimization, fault-tolerant telemetry, store-and-forward, dynamic channel allocation, low-power design, edge sensing.

I. INTRODUCTION

The growing deployment of environmental sensor networks in remote areas has created demand for low-cost, low-power sensor node designs that remain reliable under weak connectivity and limited energy budgets. Designing such nodes is a joint optimization problem spanning the sensing, communication, and power subsystems, where design choices at one layer constrain feasible choices at the others. This paper uses continuous monitoring of water level, discharge, and salinity in the Aral Sea region of Uzbekistan as a representative, demanding design case: the target deployment area combines scarce grid power, intermittent cellular and LoRa coverage, and a harsh desert environment, making it a stringent test bed for resource-constrained sensor node design.

The contribution of this paper is a system-level design methodology and a set of analytical models that guide the joint optimization of the connectivity and power subsystems of a low-cost sensor node, validated through a representative case study rather than proposing a single fixed deployment.

II. SYSTEM ARCHITECTURE AND DESIGN OPTIMIZATION

The proposed design is organized into four layers, shown in Fig. 1.

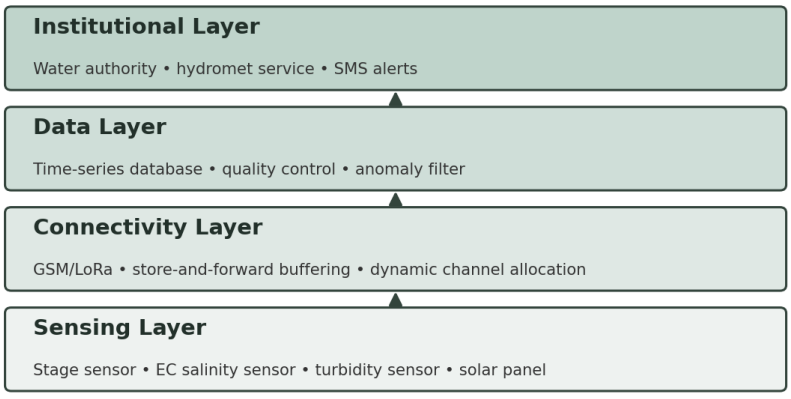


Figure 1. Four-layer architecture of the proposed resource-constrained IoT sensor node design

a. Sensing subsystem design

Non-contact radar or ultrasonic stage sensors avoid physical contact with water, reducing fouling-related maintenance cost. Electrical-conductivity (EC) sensors track salinity and optical sensors track turbidity. Each node is powered by a solar panel and battery sized according to the energy-budget model of Section III, making power sizing an explicit part of the node design rather than an afterthought.

b. Connectivity subsystem design and optimization

Nodes transmit via GSM/GPRS where available, or via LoRaWAN gateways in weak-signal areas; both links are intermittently available in remote areas, a condition analogous to intermittent feeder links in SDN-enabled LEO satellite IoT networks [1]. Adapting that design, each node buffers readings on-board using store-and-forward (S&F) logic while the link is down and transmits the backlog once connectivity resumes, which is treated here as a design optimization that reduces the cost (in retransmissions and data loss) of achieving a target delivery reliability under a given, fixed link-availability budget.

A lightweight gateway controller, playing the role of the SDN controller in [1], dynamically allocates the limited number of GSM/LoRa channel slots among sensor nodes by priority class, which is likewise a design choice that improves the achieved reliability-per-channel without increasing hardware cost.

c. Data and institutional layers

A central time-series platform performs quality control against a statistical anomaly filter and exposes processed data through a dashboard integrated with the relevant water-management authority, completing the end-to-end system design.

III. ANALYTICAL DESIGN MODELS

The connectivity link alternates between connected (ON) and disconnected (OFF) states, modeled as a two-state Markov process. Let τon and τoff denote the average durations of the connected and disconnected states; the link-availability design parameter is:

$$P_{link} = \frac{\tau_{on}}{\tau_{on} + \tau_{off}} \quad (1)$$

Each node's on-board buffer of capacity Q packets is sized using an M/M/1/K queueing model with utilization ρb = Λᵢ/μf; the resulting packet delivery success rate (PDSR), used here as the primary design-optimization objective for the connectivity subsystem, is:

$$PDSR = 1 - P_{loss},\ P_{loss} \approx \frac{(1-\rho_b)\rho_b^{K}}{1-\rho_b^{K+1}} \quad (2)$$

When the link is available, the C available channel slots are partitioned among K priority classes with design weights wₖ, subject to:

$$C_k = \lfloor w_k \cdot C \rfloor,\ \Sigma w_k = 1 \quad (3)$$

Finally, the solar panel and battery are sized so that the daily energy balance satisfies:

$$E_{batt} = E_{solar} - E_{consumption} \geq 0 \quad (4)$$

where E_{solar} is daily harvested solar energy and $E_{consumption}$ is the daily load of sensing, computation, and telemetry; equation (4) is used as a sizing constraint during node design rather than a post-hoc check.

IV. RESULTS AND DESIGN VALIDATION

Table 1 validates the connectivity design of Section II-b by comparing PDSR for direct transmission (no buffering) against the proposed S&F design across representative link-availability values.

Table 1. Design validation: direct transmission vs. proposed S&F design

Link availability, %	PDSR (direct), %	PDSR (proposed), %	Added latency, s
60	61.2	92.8	52
75	75.4	96.1	34
90	89.7	98.4	17
98	97.9	99.6	6

At 60% link availability, the proposed connectivity design raises PDSR from 61.2% to 92.8% at the cost of up to 52 s of added latency, which is an acceptable design trade-off given that the monitored physical quantities (water stage and salinity) change on a scale of minutes to hours rather than seconds. This confirms the design achieves the target reliability without increasing hardware cost.

V. CONCLUSION

This paper presented a system-level design methodology for a resource-constrained IoT sensor node, in which store-and-forward buffering and dynamic channel allocation are treated as explicit connectivity-subsystem design optimizations, supported by analytical models for link availability, buffering, and solar energy sizing. Using continuous water-resource monitoring in the Aral Sea region as a demanding representative case, the design was shown to substantially improve data-delivery reliability without added hardware cost. The methodology and models generalize beyond this case to other remote, power- and connectivity-constrained IoT sensing deployments.

ACKNOWLEDGMENT

The authors thank colleagues for their guidance during the preparation of this work.

REFERENCES

[1] Pulatov, S. A Hybrid Store-and-Forward and Dynamic Channel Allocation Approach for SDN-Enabled LEO IoT Networks / S. Pulatov, J. Isroilov, A. Gafurov, F. Abdualimov // OPTIMA. 2025.

[2] Al-Fuqaha, A. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications / A. Al-Fuqaha [et al.] // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2015. Vol. 17, No 4. P. 2347–2376.

[3] Haxhibeqiri, J. A Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology to Application / J. Haxhibeqiri [et al.] // Sensors. 2018. Vol. 18, No 11. P. 3995.

[4] Kleinrock, L. Queueing Systems, Volume I: Theory. New York: Wiley-Interscience, 1975.

[5] Water Code of the Republic of Uzbekistan. No. ZRU-1076. 30.07.2025.

[6] WildLabs.net. Using IoT and Machine Learning to help protect Kenya's Rivers [Electronic Resource]. Mode of access: https://wildlabs.net. Date of access: 12.10.2026.

[7] UNDP. UNDP Uzbekistan launches water resources project in the Aral Sea region [Electronic Resource]. 2026.

[8] Raza, U. Low Power Wide Area Networks: An Overview / U. Raza, P. Kulkarni, M. Sooriyabandara // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2017. Vol. 19, No 2. P. 855–873.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АРХИТЕКТУРЫ IoT-СЕНСОРНОГО УЗЛА С ОГРАНИЧЕННЫМИ РЕСУРСАМИ И ОТКАЗОУСТОЙЧИВОЙ ТЕЛЕМЕТРИЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Пулатов Ш., Абдуалимов Ф.

Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада аль-Хорезми, Ташкент, Узбекистан, abdualimovferuz1833@gmail.com

Аннотация: экологические сенсорные сети, развёрнутые в удалённых местах с ограниченным энергоснабжением и связностью, требуют тщательного совместного проектирования подсистем сбора данных, связи и питания. В данной работе рассматриваются проектирование и оптимизация архитектуры маломощного IoT-сенсорного узла с отказоустойчивой телеметрией на примере непрерывного мониторинга водных ресурсов в засушливом регионе как репрезентативного случая развёртывания. Предлагается четырёхуровневая системная архитектура, а уровень связности оптимизируется с помощью буферизации с накоплением и пересылкой и динамического распределения каналов, адаптированных из SDN-совместимых спутниковых сетей LEO, что снижает стоимость проектирования для достижения надёжной доставки данных по прерывистым каналам GSM/LoRa. Выводятся аналитические модели доступности канала, заполненности буфера и солнечно-энергетического бюджета для обоснования проектных компромиссов. Результаты моделирования показывают, что оптимизированное проектирование связности повышает вероятность успешной доставки пакетов с 61,2% до 92,8% при доступности канала 60%, демонстрируя эффективную низкозатратную стратегию проектирования для периферийных сенсорных систем с ограниченными ресурсами.

Ключевые слова: проектирование встраиваемых систем, IoT-сенсорный узел, оптимизация проектирования, отказоустойчивая телеметрия, накопление и пересылка, динамическое распределение каналов, маломощное проектирование, периферийное сенсорное восприятие.

UDC 004.85:621.311

MACHINE LEARNING METHODS USED FOR PROGNOSING FAILURES IN HYBRID ELECTRICITY SUPPLY SOURCES OF TELECOMMUNICATION INFRASTRUCTURE

M. Muradov

Urgench State University named after Abu Rayhan Biruni, Urgench, Uzbakiston,
muradov.muhammad1414@gmail.com

Abstract: the continuity of hybrid power supply systems for base stations (solar panel, battery, supercapacitor, diesel generator, power grid) depends on predicting failures in advance. This article systematizes fault types by components, input tokens, and applied machine learning methods (RF, SVM, XGBoost, LSTM/BiLSTM, physics-based neural networks) and compares their advantages and limitations. A three-level architecture and evaluation criteria were proposed, consisting of the edge, cloud, and digital twin. The main obstacle is the lack and disproportion of fault data; the most promising direction is the combination of physical and data-driven approaches.

Keywords: hybrid power supply; fault prediction; machine learning; LSTM; residual useful life; battery; supercapacitor; base station.

I. INTRODUCTION

Uninterrupted power supply for mobile base stations (BS) is a fundamental requirement for network reliability. In areas where the power grid is unreliable, BS are provided with a hybrid power supply system (HESS) consisting of a solar panel (PV), an accumulator (AC), a supercapacitor (SC), a diesel generator (DG), and a local power grid [1, 2]. Failure of components in such a system (decrease in AC capacitance, increase in the equivalent resistance of the SC, breakage of the CP circuits, mechanical failures of the DG) leads to power disconnection. Traditional boundary control records a malfunction only after it occurs, while a predictive approach allows for maintenance planning before an accident occurs. In recent years, artificial intelligence methods have been widely used in fault detection [3], but they are not systematized across HESS components. The purpose of the article is to analyze machine learning (ML) methods used in predicting HESS component failures based on authoritative sources and to substantiate their selection criteria.

II. ANALYSIS OF FAULT FORECASTING METHODS

a. Component methods

Table 1 summarizes the methods of ML recorded in the sources, input signals, and failures for HESS components.

Table 1. HESS component failures and ML methods

Component	Failure	Input symbols	ML methods and outputs
PV	Short circuit, disconnection, grounding, incompatibility	U, I, power, radiation, modulus temperature	SVM, DT, RF, NB, XGBoost - accuracy 97.2–98.0% [4, 5]
AC	Capacity decrease, internal resistance increase, local overheating	U, I, T, charge curve, number of cycles	LSTM/GRU, CNN, Physics-based neural networks (PINN), hybrid models [6-9]
SC	Capacity decrease, ESR increase	U, I, T, capacity, number of cycles	VMD-SSA-BiLSTM: mean RMSE 0.1125, 44.3% lower than BiLSTM [10, 11].
DG	Bearing, winding, and fuel system failures	Vibration, current, temperature	ANN, fuzzy and expert systems, complex ML methods [12]
Monitoring chain	Sensor shift, noise, data quality	Power balance balance, measurement rows	Rules, data, and hybrid-based models; hybrid - 99.96% [3, 13]

Controlled training methods for PV (SVM, decision tree, random forest, XGBoost) distinguished short circuits, interruptions, grounding, and non-compliance failures based on voltage, current, and power fluctuations generated in the MATLAB/Simulink model with an accuracy of 97.2–98.0% [4]. The AI-based PV diagnostics survey recommends hybrid approaches that combine ML, deep learning, and reinforcement learning in future research [14]. The prediction problem for AC and SC is reduced to assessing health status (SoH) and useful life remaining (LRL):

$$SoH = \frac{C_{ac}}{C_{nom}} \times 100\%, \quad (1)$$

$$LRL(t_k) = t_{EOL} - t_k, \quad t_{EOL} = min\{t \mid SoH(t) \leq SoH_{EOL}\}, \quad (2)$$

where C_{ac}, C_{nom} are the actual and nominal capacities; t_{EOL} – resource end time; SoH_{EOL} is the threshold value.

Data-driven methods for AC explore degradation patterns from historical series; the inclusion of physical equations in the loss function (PINN) is considered a promising direction for data-deficient conditions [7, 8], while predicting cyclic lifespan from early cycle data is demonstrated [9]; and the use of artificial intelligence in real-world battery diagnostics is considered [15]. The BiLSTM model, whose hyperparameters are selected by decomposition via VMD and SSA for the SC, achieved an average RMSE of 0.1125 at various temperatures and stresses, which is 44.3% lower than that of a conventional BiLSTM [10]; A review of the mechanisms and models of SC wear [11] can serve as a basis for selecting input characteristics (capacity, equivalent resistance, temperature, voltage). The review of artificial intelligence for the DG highlights fuzzy and expert systems, artificial neural networks, and complex ML methods, as well as implementation challenges - data dependence, computational demand, and model interpretation – and the integration of digital twins, explainable artificial intelligence, and the IoT [12].

b. Data and model selection issues

Liu et al. have divided fault detection models into rule-based, data-based, and hybrid-based: rule-based ones are fast and understandable but limited by predetermined situations; data-based ones learn well in complex conditions but depend on data quality; hybrid models combine flexibility and interpretation, but require more computational resources [3]. The study showed that eliminating class imbalances increased accuracy by 16.2–26.2%, feature separation based on deep learning maintained an accuracy of over 98.5% at SNR = 10 dB, hybrid models achieved 99.96% accuracy, and heuristic optimization of hyperparameters provided an improvement of 6.92–19.375% compared to basic models [3]. From this, two conclusions emerge for HESS: since fault records are few and disproportionate, methods for filling in information and eliminating discrepancies are necessary; sampling frequency affects signal quality – low frequency loses high-frequency details, while high frequency increases noise [3].

III. RECOMMENDED ARCHITECTURE AND EVALUATION CRITERIA

Based on the analysis, a three-level predictive diagnostic architecture for HESS is proposed (Fig. 1). At the extreme level (a device like ESP32 or Raspberry Pi), measurements are filtered, symbols are counted, and a lightweight model (RF or CUSUM) detects a malfunction in real time. The residual power balance [13, 16], SoC, and temperature change rate are used as characteristics; in the author's 24-hour simulation, the residual and CUSUM-based detector detected a 1 A displacement of the AC current sensor within 30 minutes with a 99% probability, whereas the static boundary method failed to detect it. At the cloud level, the LSTM/BiLSTM or PINN models predict the SoH and QU of the AC and SC, while the XGBoost/RF models predict the PV and DG states and are periodically retrained. The digital twin (MATLAB/Simulink) fills the data gap and validates models by introducing synthetic failures [12].

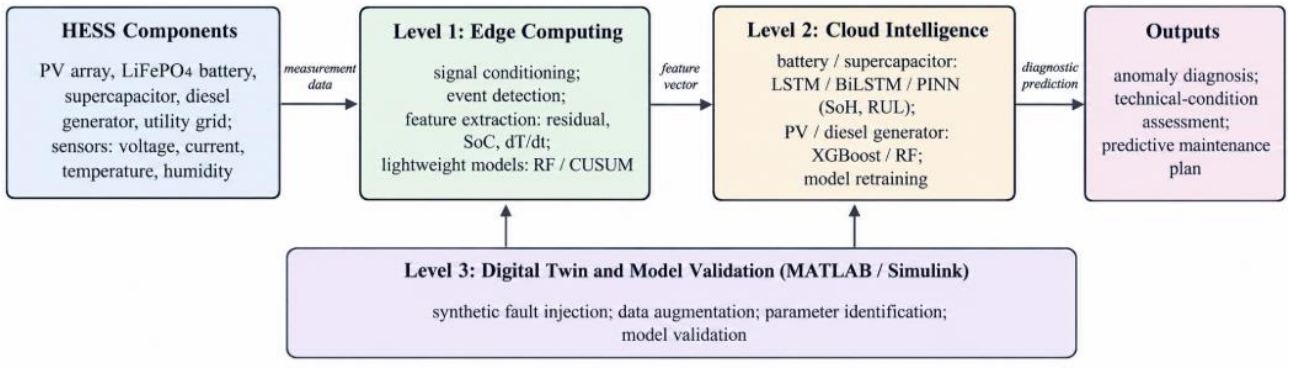


Figure 1. Three-level failure prediction architecture

Model selection criteria: (i) number of fault samples - RF/XGBoost for subtable data, LSTM/BiLSTM for long degradation series, PINN in case of data scarcity; (ii) computational resource and latency - real-time detection at the edge, heavy models in the cloud; (iii) Interpretation - explainable hybrid models for maintenance decisions. Evaluation criteria: recall for classification, F1, and the number of false alarms per day; Mean square error for QFU:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(QFU_i - QFU_{per,i}\right)^2}, \quad (3)$$

where *N* is the number of test samples; $QFU_{per,i}$ is the predicted value. The practical indicator is the prediction horizon, i.e., the time between the warning and the failure.

IV. CONCLUSION

The choice of the component-based ML method depends on the fault type and data volume: RF/SVM/XGBoost for PV, LSTM/BiLSTM and PINN for AC and SC, and ANN and hybrid models for DG. The main obstacles are insufficient and inconsistent fault data, noise, interpretation, and computational resources. The proposed edge-cloud-digital twin architecture combines real-time detection and long-term prediction. In the future, it is necessary to validate the models based on real BS data.

REFERENCES

[1] Analysis of Sustainable Energy Sources of Mobile Communication Base Stations in the Case of Khorazm Region / U. K. Matyokubov, M. M. Muradov and O. B. Djumaniyozov, // 2022 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT), Tashkent, Uzbekistan, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICISCT55600.2022.10146885. A review of renewable energy based power supply options for telecom towers / N. R. Deevela, T. C. Kandpal, B. Singh // Environment, Development and Sustainability. 2024. Vol. 26, No 2. P. 2897–2964.

[2] Development of the Method and Algorithm of Supplying the Mobile Communication Base Station with Uninterrupted Electrical Energy / U. K. Matyokubov, M. M. Muradov and J. F. Yuldoshev // 2024 IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Altai, Russian Federation, 2024, pp. 2400-2406, doi: 10.1109/EDM61683.2024.10615043..

[3] A Comprehensive Review of AI Integration for Fault Detection in Modern Power Systems: Data Processing, Modeling, and Optimization / Y. Liu [et al.] // Energies. 2025. Vol. 18, No 18. Art. 4983. https://doi.org/10.3390/en18184983.

[4] Effectiveness of supervised machine learning models for electrical fault detection in solar PV systems / V. Khandeparkar, Shreshtha, S. K. Ramu // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Art. 34919. https://doi.org/10.1038/s41598-025-18802-4.

[5] Faults detection and diagnosis of PV systems based on machine learning approach using random forest classifier / A. F. Amiri [et al.] // Energy Conversion and Management. 2024. Vol. 301. Art. 118076.

[6] Battery health monitoring and remaining useful life prediction techniques: A review of technologies / M. Ahwiadi, W. Wang // Batteries. 2025. Vol. 11, No 1. Art. 31.

[7] A review on physics-informed data-driven remaining useful life prediction: Challenges and opportunities / H. Li [et al.] // Mechanical Systems and Signal Processing. 2024. Vol. 209. Art. 111120. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111120.

[8] Physics-informed neural networks for prognostics and health management of lithium-ion batteries / P. Wen [et al.] // IEEE Transactions on Intelligent Vehicles. 2024. Vol. 9, No 1. P. 2276–2289.

[9] Data-driven prediction of battery cycle life before capacity degradation / K. A. Severson [et al.] // Nature Energy. 2019. Vol. 4. P. 383–391.

[10] Predicting the Remaining Useful Life of Supercapacitors under Different Operating Conditions / G. Qi, N. Ma, K. Wang // Energies. 2024. Vol. 17, No 11. Art. 2585. https://doi.org/10.3390/en17112585.

[11] Aging Mechanism and Models of Supercapacitors: A Review / N. Ma [et al.] // Technologies. 2023. Vol. 11, No 2. Art. 38. https://doi.org/10.3390/technologies11020038.

[12] A Review of Artificial Intelligence Applications in Predicting Faults in Electrical Machines / M. Habyarimana, A. A. Adebiyi // Energies. 2025. Vol. 18, No 7. Art. 1616. https://doi.org/10.3390/en18071616.

[13] Model-based fault-detection and diagnosis – status and applications / R. Isermann // Annual Reviews in Control. 2005. Vol. 29, No 1. P. 71–85.

[14] Artificial-Intelligence-Based Detection of Defects and Faults in Photovoltaic Systems: A Survey / A. Thakfan, Y. Bin Salamah // Energies. 2024. Vol. 17, No 19. Art. 4807. https://doi.org/10.3390/en17194807.

[15] Artificial intelligence-driven real-world battery diagnostics / J. Zhao [et al.] // Energy and AI. 2024. Vol. 18. Art. 100419. https://doi.org/10.1016/j.egyai.2024.100419.

[16] Assessment of the state of disruptions in the power supply system of a mobile communication base station / D.Davronbekov, M.Muradov, // Scientific Journal of Astana IT University, 21, 125–136. 2025. https://doi.org/10.37943/21JFNX5577.

МЕТОДЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОТКАЗОВ В ГИБРИДНЫХ ИСТОЧНИКАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Мурадов М.

Ургенчский государственный университет имени Абу Райхана Беруни, Ургенч, Узбекистан,
muradov.muhammad1414@gmail.com

Аннотация: непрерывность работы гибридных систем электроснабжения базовых станций (фотоэлектрические панели, аккумулятор, суперконденсатор, дизельный генератор, электросеть) зависит от заблаговременного прогнозирования отказов. В данной статье систематизируются типы неисправностей по компонентам, входные данные и применяемые методы машинного обучения (RF, SVM, XGBoost, LSTM/BiLSTM, физически обоснованные нейронные сети), а также сравниваются их преимущества и ограничения. Предложена трехуровневая архитектура и критерии оценки, состоящие из периферийного уровня, облака и цифрового двойника. Основным препятствием является недостаток и диспропорция данных об отказах; наиболее перспективным направлением является сочетание физических и данных-ориентированных подходов.

Ключевые слова: гибридное электроснабжение; прогнозирование отказов; машинное обучение; LSTM; остаточный полезный ресурс; аккумулятор; суперконденсатор; базовая станция.

УДК 621.396.93

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ СЕТЕЙ СОТОВОЙ СВЯЗИ СТАНДАРТА LTE

Пулатова Ш.У., Узакбаев Е.О., Шавкатов Ж.Ж.

Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада аль-Хорезми, Ташкент, Узбекистан, e.uzakbaev@tuit.uz

Аннотация: выполнены систематизация и сравнительный анализ ключевых методов повышения энергоэффективности сетей сотовой связи стандарта LTE, стандартизованных в рамках проекта 3GPP. Рассмотрены прерывистый приём DRX/C-DRX и управление мощностью передачи на стороне абонентского устройства, координация межсотовых помех eICIC, совместная многоточечная передача CoMP и адаптивное планирование радиоресурсов на стороне сети, а также архитектурные решения на базе MIMO/Beamforming, ретрансляции и малых сот. Для каждой группы методов приведены аналитические модели энергопотребления, SINR и энергетической эффективности, формально обосновывающие их достоинства и недостатки. Показано, что все рассмотренные решения функционируют в условиях компромисса между энергопотреблением, задержкой и пропускной способностью сети.

Ключевые слова: LTE; энергоэффективность; DRX; eICIC; CoMP; MIMO; малые соты.

I. ВВЕДЕНИЕ

Рост числа абонентских устройств и объёмов передаваемого трафика в сетях мобильной связи обуславливает повышенное внимание к вопросам энергетической эффективности как со стороны операторов, стремящихся снизить эксплуатационные расходы и углеродный след инфраструктуры, так и со стороны производителей оборудования, заинтересованных в увеличении времени автономной работы устройств [9, 10]. Стандарт LTE, разработанный в рамках партнёрского проекта 3GPP, изначально предусматривал ряд механизмов снижения энергопотребления при сохранении требуемого уровня качества обслуживания (QoS); эти механизмы затрагивают различные уровни архитектуры сети – от физического уровня радиоинтерфейса до алгоритмов распределения ресурсов и топологии развёртывания базовых станций.

Целью настоящей работы является систематизация ключевых энергоэффективных технологий LTE, критический анализ их достоинств и недостатков и построение аналитических моделей, количественно описывающих возникающие компромиссы. Работа выполнена на основе аналитического обзора публикаций, индексируемых в базах данных IEEE Xplore, ScienceDirect, MDPI и arXiv, за период 2009–2025 гг. В качестве сквозной количественной метрики принята энергетическая эффективность EE, определяемая как отношение достигнутой скорости передачи данных R к суммарной потребляемой мощности P_{tot}:

$$EE = \frac{R}{P_{tot}} \quad [\text{бит/Дж}]. \tag{1}$$

Данная метрика позволяет единообразно сопоставлять методы, воздействующие на числитель (повышение R за счёт MIMO, CoMP) и на знаменатель (снижение P_{tot} за счёт DRX, управления мощностью и малых сот) [10, 11]. Рассмотренные технологии систематизированы по трём уровням архитектуры LTE (рисунок 1).



Рисунок 1. Классификация методов энергоэффективности LTE по уровням архитектуры сети

II. МЕТОДЫ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ LTE

а. Уровень абонентского устройства

Механизм прерывистого приёма DRX и его модификация C-DRX для режима с установленным соединением позволяют абонентскому устройству периодически прекращать мониторинг канала управления PDCCH при отсутствии нисходящего трафика [1]. Среднее энергопотребление устройства описывается упрощённой двухуровневой моделью «активное состояние / состояние сна»:

$$P_{avg} = \frac{T_{on}P_{on} + T_{sleep}P_{sleep}}{T_{on} + T_{sleep}}, \quad \rho_{sleep} = \frac{T_{DRX} - T_{on}}{T_{DRX}}, \tag{2}$$

где T_{on} и T_{sleep} – суммарная продолжительность пребывания устройства в активном состоянии и состоянии сна в течение одного цикла DRX; P_{on} и P_{sleep} – соответствующие уровни потребляемой мощности ($P_{sleep} \ll P_{on}$); ρ_{sleep} - доля времени цикла, приходящаяся на сон.

Из выражения (2) следует, что средняя мощность P_{avg} линейно убывает при увеличении ρ_{sleep}. Обратной стороной является рост средней задержки: с использованием аппарата теории массового обслуживания для систем с «отпусками сервера» вклад цикла DRX в задержку оценивается величиной $T_{DRX}/2$, то есть растёт линейно с удлинением цикла [2]. К достоинствам метода относятся существенное снижение энергопотребления устройства (по данным [3] – до 96,7 % относительно схемы без DRX), совместимость с существующей сигнализацией RRC и возможность адаптации параметров к характеру трафика, в том числе на основе прогнозирующих моделей машинного обучения [4]. Недостатки – увеличение задержки доставки пакетов, слабая адаптивность статического набора таймеров [5] и рост вычислительной сложности адаптивных схем.

Управление мощностью передачи восходящей линии связи (3GPP TS 36.213) реализует дробную компенсацию потерь на трассе с коэффициентом $\alpha \in [0; 1]$: при $\alpha < 1$ абонентам, находящимся вблизи базовой станции, разрешается передавать с существенно меньшей мощностью, что снижает как энергопотребление устройства, так и уровень создаваемых им межсотовых помех – ценой некоторого снижения достижимой скорости передачи для удалённых пользователей [11]. Ограничениями метода являются высокая вычислительная сложность нелинейной оптимизации, вероятность ошибок регулирования при быстро меняющихся условиях канала и дополнительная сигнальная нагрузка канала обратной связи.

б. Уровень сети радиодоступа

Технология eICIC, введённая в спецификации 3GPP LTE-Advanced (Release 10), обеспечивает временную координацию работы соседних сот за счёт использования «почти пустых» субкадров (Almost Blank Subframes, ABS) [6]. Отношение сигнал/(шум+помеха), достигаемое пользователем пикосоты в субкадрах, замалчиваемых макросотой, приближённо представимо как:

$$SINR_{pico} = \frac{P_{pico}\, g_{pico}}{N_0 + (1-\mu)\, P_{macro}\, g_{macro}}, \tag{3}$$

где $\mu \in [0; 1]$ – доля субкадров, передаваемых макросотой в режиме ABS.

При $\mu \to 1$ интерференция от макросоты в знаменателе стремится к N_0 и $SINR_{pico}$ резко возрастает; ценой такого выигрыша является пропорциональное сокращение доли ресурсов, доступных пользователям макросоты [7], - в этом и состоит основной компромисс технологии. Дополнительными недостатками являются необходимость сложной координации между территориально разнесёнными станциями и рост объёма служебной сигнализации.

Технология CoMP предполагает одновременное обслуживание абонентского устройства несколькими координированными базовыми станциями. Когерентное суммирование сигналов обеспечивает выигрыш в отношении сигнал/шум, однако требует дополнительных затрат мощности на синхронизацию и обмен данными по транспортной сети (backhaul):

$$EE_{CoMP} = \frac{R_{JT}}{N\, P_{BS} + P_{bh}}, \tag{4}$$

где N - число координируемых станций; P_{BS} - мощность, потребляемая одной базовой станцией; P_{bh} - эквивалентная мощность, затрачиваемая на функционирование транспортной сети.

Поскольку скорость совместной передачи R_{JT} растёт с увеличением N логарифмически, а знаменатель – линейно, предельная энергетическая эффективность кооперации снижается при увеличении её масштаба [8]. Адаптивное планирование радиоресурсов формально сводится к максимизации EE (формула (1)) при ограничениях QoS; совместный учёт состояния канала и параметров DRX

обеспечивает существенное дополнительное энергосбережение [3] ценой высокой вычислительной сложности и риска несправедливого распределения ресурсов между абонентами.

в. Архитектурный уровень

Многоантенные технологии MIMO и формирования диаграммы направленности повышают пропускную способность канала быстрее, чем логарифмически, без пропорционального роста излучаемой мощности, что положительно влияет на числитель метрики (1) [10]. Вместе с тем статическая составляющая мощности радиочастотных трактов растёт с числом антенных элементов, частично компенсируя полученный выигрыш, а реализация таких схем в компактных абонентских устройствах затруднена. Ретрансляционные узлы и малые соты сокращают расстояние между передатчиком и приёмником: для пико- и фемтосот статическая мощность P_0 на один-два порядка ниже, чем для макросот [12], что обеспечивает высокий уровень энергосбережения и улучшает покрытие внутри зданий. Однако при плотном развёртывании суммарная составляющая $N \cdot P_0$ может приводить к росту общего энергопотребления сети и требует управления возросшим уровнем межсотовой интерференции [13].

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обобщённые результаты сравнительного анализа рассмотренных технологий приведены в таблице 1. Наибольший эффект энергосбережения на уровне абонентского устройства достигается при совместном использовании DRX и адаптивного планирования, учитывающего состояние канала и требования QoS [3]; при этом количественные оценки существенно варьируются в зависимости от допустимой целевой задержки и модели трафика. На уровне сети методы координации помех и малые соты обеспечивают умеренный либо высокий уровень энергосбережения при нейтральном или положительном влиянии на QoS, однако характеризуются высокой сложностью реализации: как следует из выражений (3) и (4), выигрыш для одной группы пользователей достигается ценой явного количественного проигрыша для другой. Полученные результаты согласуются с выводами обзорных работ по «зелёным» сетям связи, отмечающих отсутствие универсального решения и необходимость комплексного многоуровневого подхода [9, 10].

Таблица 1. Сравнительная оценка методов энергоэффективности LTE

Метод	Энергосбережение	Влияние на QoS	Сложность
DRX / C-DRX	Высокое	Среднее (задержки)	Низкая
Управление мощностью	Среднее	Низкое	Средняя
eICIC	Среднее	Низкое	Высокая
CoMP	Среднее	Положительное	Очень высокая
Адаптивное планирование	Среднее	Положительное	Высокая
MIMO / Beamforming	Косвенное	Положительное	Высокая
Small Cells / Relaying	Высокое	Положительное	Высокая

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Энергоэффективность сетей стандарта LTE обеспечивается комплексным применением методов на трёх уровнях: абонентского устройства (DRX/C-DRX, управление мощностью), сети радиодоступа (eICIC, CoMP, адаптивное планирование) и архитектуры развёртывания (MIMO/Beamforming, малые соты и ретрансляция). Ключевой особенностью всех рассмотренных решений является наличие компромисса между энергопотреблением, задержкой передачи данных и пропускной способностью сети; приведённые аналитические модели (1)-(4) позволяют формально обосновать природу этого компромисса и могут служить основой количественной оптимизации при проектировании сети. Выбор конкретного метода или их комбинации должен осуществляться с учётом сценария развёртывания, характеристик обслуживаемого трафика и допустимого уровня деградации QoS. Перспективным направлением дальнейших исследований является количественное сопоставление рассмотренных механизмов LTE с аналогичными решениями сетей пятого поколения 5G NR.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Bontu, C. S. DRX mechanism for power saving in LTE / C. S. Bontu, E. Illidge // IEEE Communications Magazine. 2009. Vol. 47, No 6. P. 48–55.

[2] Adaptive DRX scheme to improve energy efficiency in LTE networks with bounded delay / S. Herrería-Alonso [et al.] // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2016. Vol. 34, No 4. P. 2963–2973.

[3] Reducing power consumption in LTE data scheduling with the constraints of channel condition and QoS/ L.-P. Tung [et al.] // Computer Networks. 2014. Vol. 75, Part A. P. 149–159.

[4] Improved Connected-Mode Discontinuous Reception (C-DRX) power saving and delay reduction using ensemble-based traffic prediction / J.-H. Yu [et al.] // Mathematics. 2025. Vol. 13, No 6. Art. 974.

[5] A survey on DRX mechanism: device power saving from LTE and 5G New Radio to 6G communication systems / K.-H. Lin [et al.] // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2023. Vol. 25, No 1. P. 156–183.

[6] Enhanced inter-cell interference coordination for heterogeneous networks in LTE-Advanced: a survey / L. Lindbom [et al.] // arXiv preprint arXiv:1112.1344. 2011.

[7] Algorithms for enhanced inter-cell interference coordination (eICIC) in LTE HetNets / S. Deb [et al.] // IEEE/ACM Transactions on Networking. 2014. Vol. 22, No 1. P. 137–150.

[8] Fehske, A. J. Bit per Joule efficiency of cooperating base stations in cellular networks / A. J. Fehske, P. Marsch, G. P. Fettweis // IEEE GLOBECOM Workshops. Miami, FL, USA, 2010. P. 1406–1411.

[9] Hasan, Z. Green cellular networks: a survey, some research issues and challenges / Z. Hasan, H. Boostanimehr, V. K. Bhargava // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2011. Vol. 13, No 4. P. 524–540.

[10] A survey of energy-efficient techniques for 5G networks and challenges ahead / S. Buzzi [et al.] // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2016. Vol. 34, No 4. P. 697–709.

[11] Energy-efficient power control: a look at 5G wireless technologies / A. Zappone [et al.] // IEEE Transactions on Signal Processing. 2016. Vol. 64, No 7. P. 1668–1683.

[12] How much energy is needed to run a wireless network? / G. Auer [et al.] // IEEE Wireless Communications. 2011. Vol. 18, No 5. P. 40–49.

[13] Khirallah, C. Energy and cost impacts of relay and femtocell deployments in Long-Term-Evolution Advanced / C. Khirallah, J. S. Thompson, H. Rashvand // IET Communications. 2011. Vol. 5, No 18. P. 2617–2628.

[14] D.A. Davronbekov, U.T. Aliyev, Sh.U. Pulatov, J.D. Isroilov, F.X. Fayzullaev. Features of Technologies for Transmission of Radio and Television in 4G/5G Networks // ICISCT. DOI: 10.1109/ICISCT52966.2021.9670182

[15] Pulatov Sh.U., Aliyev U.T., Isroilov J.D. Energy harvesters wireless charging technology // ICISCT. DOI: 10.1109/ICISCT.2017.8188566

ENERGY-EFFICIENT METHODS AND TECHNOLOGIES OF LTE CELLULAR NETWORKS: ADVANTAGES AND DISADVANTAGES

Sh.U. Pulatov, E.O. Uzakbaev, J.J. Shavkatov

Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, Tashkent, Uzbekistan, e.uzakbaev@tuit.uz

Abstract: key methods for improving the energy efficiency of LTE cellular networks standardized within the 3GPP project are systematized and comparatively analyzed. Discontinuous reception (DRX/C-DRX) and uplink transmit power control at the user equipment side, enhanced inter-cell interference coordination (eICIC), coordinated multi-point (CoMP) transmission and adaptive radio resource scheduling at the network side, as well as MIMO/beamforming, relaying and small-cell architectures are considered. Analytical models of power consumption, SINR and energy efficiency are given for each group of methods, formally justifying their advantages and disadvantages. All the reviewed solutions are shown to operate under a trade-off between energy consumption, delay and network throughput.

Keywords: LTE; energy efficiency; DRX; eICIC; CoMP; MIMO; small cells.

УДК 004.457

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ AB INITIO РАСЧЕТОВ ЗОННОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ДАТАСЕТОВ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ

Баглов А.В.[1,2], Хорошко Л.С.[1,2]

[1]Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь, baglov@bsu.by

[2]Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь

Аннотация: описаны новые функциональные возможности кроссплатформенного анализатора зонной структуры материалов для пакетов OpenMX и CASTEP. Благодаря переходу к модульной архитектуре «Бэкенд – Ядро – Фронтенд» обеспечена высокая производительность и масштабируемость системы. Продемонстрировано применение инструмента для автоматизированной подготовки физически обоснованных наборов данных, адаптированных для обучения моделей машинного обучения и больших языковых моделей. Гибкая система бэкендов позволяет оперативно расширять перечень поддерживаемых научных пакетов.

Ключевые слова: анализ данных, постобработка, C++, gnuplot, OpenMX, моделирование, электронная структура, большие языковые модели.

I. ВВЕДЕНИЕ

В наноматериаловедении для расчёта структурных, электронных и оптических свойств применяются как классические, так и квантово-механические подходы. Наибольшую точность обеспечивают первопринципные (*ab initio*) методы [1], однако их вычислительная стоимость ограничивает размер исследуемых систем ~100 атомов. При дизайне новых материалов, требующем перебора множества составов и структур, прямой расчёт становится нецелесообразным. Альтернативой служит использование больших языковых моделей (БЯМ), способных классифицировать материалы и предсказывать их свойства без проведения расчётов, эффективно сужая пространство поиска. В отличие от графовых нейронных сетей, БЯМ непосредственно обрабатывают стандартизированные текстовые представления структур (CIF, POSCAR), выявляя закономерности «структура–свойство» через механизмы внимания.

Для обучения БЯМ необходим датасет, включающий кристаллическую структуру, химический состав и зонную структуру. Экспериментальная сложность определения последней обусловливает использование *ab initio* расчётов для генерации данных, при этом рост числа электронных состояний с размером системы увеличивает затраты на подготовку выборок. Полученные данные требуют существенной постобработки. Авторы используют пакет OpenMX [2–9] и ранее разработали для него анализатор зонной структуры [10]. В данной работе представлено расширение его функциональности и продемонстрирована эффективность в качестве связующего звена (*middleware*) для автоматизированной генерации обучающих выборок для БЯМ.

II. ОПИСАНИЕ АНАЛИЗАТОРА ЗОННОЙ СТРУКТУРЫ

Взаимодействие с анализатором, как и с пакетом OpenMX, осуществляется через механизм CLI (Command Line Interface – интерфейс командной строки). Приложение полностью написано на языке C++ и не имеет никаких зависимостей, кроме математической библиотеки и рантайма C++, что обеспечивает высокую производительность и переносимость кода. Сборка осуществляется с помощью утилит make и nmake под Linux и Windows соответственно. Исходные «сырые» данные разбиваются анализатором на две части: свойства решетки и зонная структура. Результаты работы анализатора могут направляться в стандартный поток вывода, текстовые файлы или комбинированным образом – и на экран, и в файл. Для вывода ошибок используется стандартный поток ошибок. Текущая версия 0.4.2.0 значительно доработана в сравнении с ранее описанной версией 0.3.4.2 [10]. Пересмотрено и расширено представление результатов анализа. Помимо изменений в представлении результатов анализа проведен значительный рефакторинг исходного кода с переходом к модульной архитектуре «Бэкенд – Ядро – Фронтенд». Бэкенд занимается чтением сырых данных, конвертаций и приведением типов для заполнения специальной структуру данных, передаваемой в ядро анализатора. Такой подход позволяет отделить функциональные возможности ядра от формата входных данных, что позволило нам подготовить бэкенд для широко известного пакета квантово-механического моделирование CASTEP в дополнение к основному бэкенду для OpenMX. В ядре анализатора также сделан ряд изменений, облегчающих обработку и вывод данных за счет ряда оптимизаций и

использования шаблонных функций. Фронтенд отвечает за направление данных либо в стандартный поток вывода, либо в файлы. Поскольку используется семантика перемещения и RVO (Return Value Optimization), то переход к модульной архитектуре не привнес дополнительных расходов, а оптимизация позволила добиться некоторого ускорения в сравнении с ранней версией. В версии 0.4.2.0 была переработана логика взаимодействия с анализатором. Ниже приведен список ключевых изменений и новых параметров:

-kpts – новый параметр. Заменяет -lk. Выводит нумерованный список k-точек;

-l – выводит информацию о прямой и обратной решетках;

-lk – функционал изменен. Дополнительно выводит информацию о сегментах обхода обратной решетки вдоль особых точек высокой симметрии;

-exact – новый параметр. Активирует вывод значений повышенной точности в блоке SUMMARY;

-vbm – удален. Функциональность перекрывается параметром -exact;

Полностью переработана и расширена поддержка пакета научной визуализации gnuplot в Linux и Windows. Поддерживается работа как с OpenMX, так и с CASTEP. Для работы с gnuplot используются параметры -g и -gp. Задание параметра -g приводит к созданию исполняемого файла (скрипта) с расширением cmd в Windows и расширением plt в Linux. Запуск скрипта по двойному клику инициализирует gnuplot в интерактивном режиме для просмотра зонной структуры. Задание параметра -gp заменяет интерактивную работу gnuplot генерацией изображения в формате png. Настройки вывода (шрифты, толщина линий, сетка) по умолчанию соответствуют стандартам научных публикаций (рис. 1). Файлы cmd/plt имеют формат UTF-8 и при необходимости могут быть открыты в текстовом редакторе и скорректированы под требования пользователя, что позволяет использовать спецсимволы в подписях при необходимости.

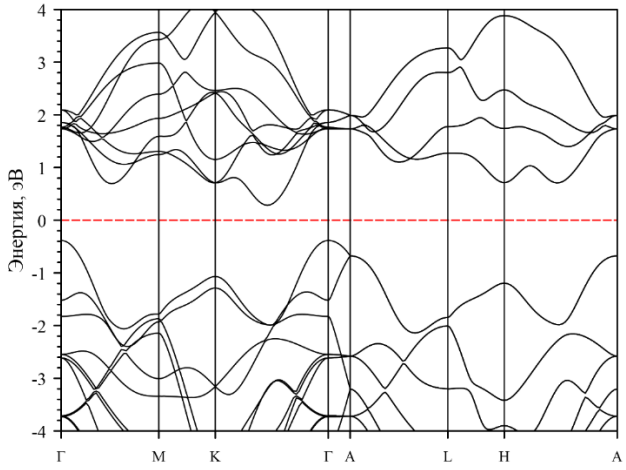


Рисунок 1. Зонная структура 2H-MoS_2, построенная с помощью сгенерированного скрипта для gnuplot. Вручную скорректирована область энергий и соотношение сторон

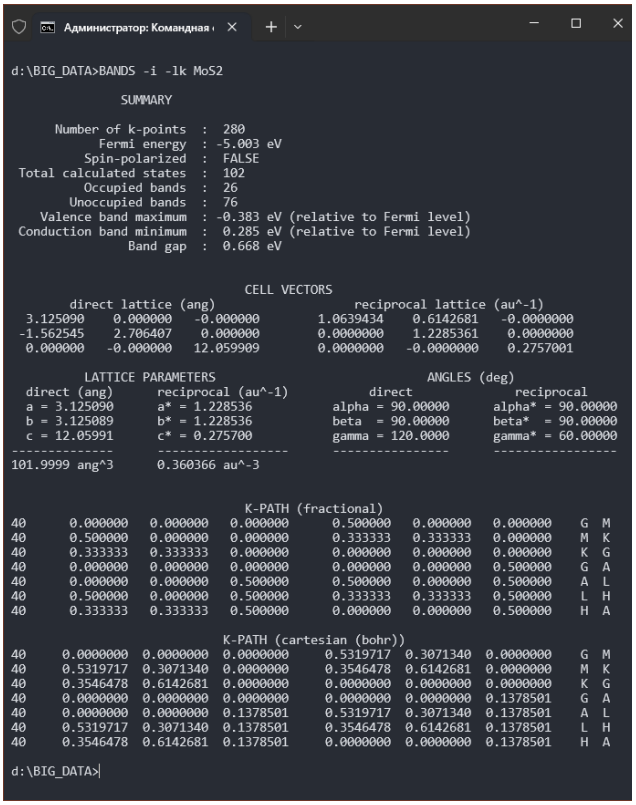


Рисунок 2. Пример результата работы анализатора в операционной системе Windows на тестовой задаче

III. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В КАЧЕСТВЕ СВЯЗУЮЩЕГО ЗВЕНА

Анализатор может функционировать в режиме предоставления описания исследуемой системы, что делает его эффективным инструментом для формирования и оптимизации датасетов.

В блоке SUMMARY дается краткая информация о электронной подсистеме. Важно отметить, что значение энергии Ферми, получаемое в расчетах, специфично для каждой конкретной реализации численного метода (конструкция псевдопотенциалов, вид базис, алгоритм смешивания электронной плотности и т.д.). По этой причине оно не может напрямую сравниваться между различными программными пакетами и, тем более, экспериментальными данными. Поскольку анализатор это CLI-приложение, можно подготовить скриптовый препроцессор для автоматизированного извлечения необходимых данных и формирования датасета. В данном контексте представляют интерес следующие параметры: число k-точек, наличие или отсутствие спиновой поляризации, число занятых состояний, положения экстремумов зон и ширина энергетической щели. При подготовке данных о кристаллической структуре можно прочитать входной файл для OpenMX, где содержится информация о векторах трансляции прямой решетки и позициях атомов в ней. Более полную информацию о свойствах решетки также можно найти в выходных данных анализатора, блок CELL VECTORS. Для удобства восприятия мы выбрали дифференцированное представление параметров прямой решетки в ангстремах, а обратной решетки в атомных единицах (Борах), дополнительно предоставляется информация об объемах прямой и обратной решеток, а также углах в них. В контексте подготовки датасета можно использовать данные либо прямой решетки, либо обратной, поскольку они определяются взаимно однозначно [11]. Блок данных, связанный с особыми точками высокой симметрии и промежуточными между ними информативен в первую очередь для исследователя и служит для верификации корректности выбранного пути в обратной решетке.

Поскольку для исследователя более интересны электронные состояния вблизи потолка валентной зоны и дна зоны проводимости, анализатор позволяет извлечь зоны в заданном диапазоне индексов. Выбор оптимального числа зон для обучения модели не всегда очевиден, поэтому мы предлагаем опираться на предоставляемую анализатором информацию о глобальных минимумах и максимумах каждой зоны. В рассматриваемом примере (см. рисунки 1 и 2) зоны с первой по двенадцатую лежат на ≈ 14–60 эВ ниже потолка валентной зоны, а потому могут быть отброшены. Таким образом остается 14 валентных зон, которые необходимо извлечь. Аналогично можно поступить и с зонами проводимости. В принципе, можно еще сильнее ограничить область интересующих энергий, например ±5 эВ, что уменьшит число зон до 20 (12 валентных и 8 проводимости), что пятикратно уменьшает объем данных для датасета. Такая оптимизация радикально снижает вычислительные затраты на обучение БЯМ, сохраняя при этом всю физически значимую информацию о поведении электронов вблизи запрещенной зоны.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлено развитие функциональных возможностей кроссплатформенного анализатора зонной структуры. Показано, что переход к модульной архитектуре «Бэкенд – Ядро – Фронтенд» и использование возможностей стандарта C++ и выше (семантика перемещения, RVO) позволили повысить высокую производительность при нулевых внешних зависимостях. Инструмент полностью кроссплатформенный и легко интегрируется в автоматизированные конвейеры обработки данных. Добавлен бэкенд для широко известного пакета для квантово-механических расчетов CASTEP. Переработана система интеграции с gnuplot, обеспечивающая генерацию изображений журнального качества в автоматическом режиме. Поддержка кодировки UTF-8 позволяет корректно отображать кириллицу и специальные символы, упрощая подготовку научных публикаций. Предложенный инструмент решает критическую задачу подготовки качественных, физически обоснованных обучающих выборок. Дифференцированное представление параметров решетки и извлечение основных характеристик электронной подсистемы позволяют минимизировать смещение моделей при обучении на подготовленных данных с сохранением физически значимой информации о состояниях вблизи уровня Ферми. Таким образом, разработанный анализатор закладывает фундамент для создания масштабируемых систем предсказательного моделирования, способных значительно ускорить поиск и дизайн новых функциональных наноматериалов, минимизируя необходимость в дорогостоящих квантово-механических расчетах.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа частично поддержана БРФФИ (проект № Т25МЭ-007), а также в рамках задания № 1.2.2 «Тонкопленочные и двумерные полупроводниковые материалы на основе углерода, халькогенидов, в том числе тугоплавких металлов, и неорганических перовскитов для приложений сенсорики, фотовольтаики, нано- и оптоэлектроники» подпрограммы «Физика конденсированного состояния, разработка технологий создания функциональных инструментальных материалов и устройств», НИР «Низкотемпературный синтез и свойства наноструктурированных композитов на основе перовскитных соединений с кластерами редкоземельных элементов и углерода для конвертеров оптического излучения и фотовольтаики» подпрограммы «Наноструктуры, наноматериалы и технологии» ГПНИ

«Современное материаловедение, перспективные материалы и новые технологии»; НИР «Разработка научных основ и методов сенсибилизации, детектирования и фотокаталитической деструкции органических загрязнителей, включая микро- и нанопластики, в водных средах с применением гибридных мультифункциональных нанокомпозитов на основе оксидных полупроводников» подпрограммы «Междисциплинарные исследования и перспективные технологии» ГПНИ «Конвергенция 2030».

Авторы выражают благодарность системному архитектору компании Andersen Lab (ПВТ) Н.А. Шиманскому за полезную дискуссию в области подготовки компактных БЯМ.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Shevlin, S. Computational materials design / S. Shevlin, B. Castro, X. Li // Nature Materials. 2021. Vol. 20. P. 727–728. https://doi.org/10.1038/s41563-021-01038-8.

[2] Ozaki, T. Variationally optimized atomic orbitals for large-scale electronic structures / T. Ozaki // Physical Review B. 2003. Vol. 67, No 15. P. 155108. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.67.155108.

[3] Ozaki, T. Numerical atomic basis orbitals from H to Kr / T. Ozaki, H. Kino // Physical Review B. 2004. Vol. 69, No 19. P. 195113. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.69.195113.

[4] Ozaki, T. Efficient projector expansion for the ab initio LCAO method / T. Ozaki, H. Kino // Physical Review B. 2005. Vol. 72, No 4. P. 045121. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.72.045121.

[5] Baglov, A. V. Atom Species Energy Dependence on Magnetic Configurations in the Perovskite Yttrium Orthoferrite / A. V. Baglov, L. S. Khoroshko // Doklady BGUIR. 2021. Vol. 19, No 8. P. 63–67. https://doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-8-63-67.

[6] Baglov, A. V. Crystal Structure and Electronic Properties of Rhenium Disulfide / A. V. Baglov, L. S. Khoroshko // Journal of Applied Spectroscopy. 2022. Vol. 89. P. 860–864. https://doi.org/10.47612/0514-7506-2022-89-5-651-656.

[7] Evolution of Structural and Electronic Properties Standardized Description in Rhenium Disulfide at the Bulk-Monolayer Transition / A. Baglov [et al.] // Heliyon. 2024. Vol. 10. P. e28646. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28646.

[8] Electronic Structure of Bismuth Ferromanganite $BiFe_{0.5}Mn_{0.5}O_3$ / A. V. Baglov [et al.] // Semiconductors. 2024. Vol. 58, No 13. P. 1054–1059. https://doi.org/10.1134/S1063782624700040

[9] Baglov, A. V. Structural and Electronic Properties of $SmGaGe_2O_7$ Studied by First Principles Methods / A. V. Baglov, L. S. Khoroshko // Inorganic Materials. 2023. Vol. 59, No 1. P. 1–7. https://doi.org/10.1134/S002016852301003X

[10] Баглов, А.В. Кросс-платформенный анализатор зонной структуры материалов для пакета квантово-механического моделирования OpenMX / А.В. Баглов, Л.С. Хорошко // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23. No 5. С. 83–92. https://doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-83-92.

[11] Ашкрофт, Н. Физика твердого тела: в 2 т / Н. Ашкрофт, Н. Мермин //I–II. М.: Мир. – 1979.

A TOOL FOR AUTOMATING THE PROCESSING OF AB INITIO ZONE STRUCTURE CALCULATIONS FOR PREPARING DATASETS OF LARGE LANGUAGE MODELS

A. Baglov[1,2], L. Khoroshko[1,2]

[1]Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus, baglov@bsu.by

[2]Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Abstract: the new functionality of a cross-platform material band structure analyzer for the OpenMX and CASTEP packages is described. The transition to a modular "backend-core-frontend" architecture ensures high system performance and scalability. This paper shows how to use the tool to automatically prepare physically based datasets for training machine learning and large language models. The flexible backend system enables the rapid expansion of supported scientific packages.

Keywords: data analysis, postprocessing, C++, gnuplot, OpenMX, modeling, electronic structure, large language models.

УДК 004.021:004.75

АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ВИРТУАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРОЙ НА БАЗЕ VMMANAGER С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ANSIBLE

Стрельцов А.Д., Пискун Г.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, strelsov92@gmail.com

Аннотация: в статье рассматривается проблема автоматизации управления виртуальной инфраструктурой на платформе VMmanager. Проанализированы технологические основы интеграции VMmanager API с системой управления конфигурациями Ansible, включая архитектуру API, механизмы авторизации и существующие решения Infrastructure as Code. Представлен практический опыт внедрения автоматизации в хостинговой компании с парком из 350 виртуальных машин. Выполнена количественная оценка эффективности автоматизированного подхода путем сравнения временных затрат и частоты ошибок при ручном управлении через веб-интерфейс, использовании Python-скриптов и применении Ansible-модулей. Результаты исследования демонстрируют сокращение времени выполнения массовых операций до 94%, снижение количества ошибок в 3-4 раза и экономическую эффективность со сроком окупаемости 7,5 месяцев. Сделан вывод о практической значимости автоматизации для организаций, использующих VMmanager в условиях импортозамещения.

Ключевые слова: VMmanager, Ansible, автоматизация, Infrastructure as Code, IaC, управление виртуальной инфраструктурой, API, REST API, KVM, виртуализация, DevOps, идемпотентность, оркестрация, Astra Linux, ISPsystem, управление конфигурациями, эффективность автоматизации.

ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции развития информационных технологий характеризуются стремительным ростом сложности и масштабов ИТ-инфраструктуры предприятий. Традиционные методы ручного администрирования серверов и виртуальных машин становятся узким местом, препятствующим гибкому развитию бизнеса. В ответ на этот вызов сформировалась парадигма Infrastructure as Code – подход к управлению инфраструктурой, при котором конфигурации описываются в декларативных файлах и версионируются подобно исходному коду приложений.

VMmanager – российская платформа управления серверной виртуализацией от компании ISPsystem, позволяющая создавать отказоустойчивые среды на базе KVM. Платформа включена в Единый реестр российского программного обеспечения и поддерживает работу на ОС Astra Linux. Ansible – система управления конфигурациями, реализующая push-модель без необходимости установки агентов на управляемые узлы. Ключевым понятием Ansible является идемпотентность – многократное применение одной и той же конфигурации не приводит к избыточным изменениям, если система уже находится в требуемом состоянии [1].

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности управления виртуальной инфраструктурой в условиях импортозамещения и перехода на отечественное программное обеспечение. VMmanager активно внедряется в государственных учреждениях и коммерческих организациях, однако вопросы ее автоматизации остаются недостаточно изученными.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНТЕГРАЦИИ VMMANAGER И ANSIBLE

VMmanager предоставляет RESTful API для программного управления всеми аспектами платформы. Базовый URL для доступа к API имеет следующую структуру: *https://domain.com/service/api_version/function/*. Платформа поддерживает три основных HTTP-метода: GET для получения информации, POST для создания ресурсов и выполнения действий, DELETE для удаления объектов. Параметры запросов передаются в теле запроса в формате JSON, ответы также возвращаются в виде JSON-объектов.

Для фильтрации данных при GET-запросах VMmanager поддерживает механизм, аналогичный SQL-выражениям с операторами WHERE, ORDERBY и LIMIT. Например, запрос для получения кластера с идентификатором 1 выглядит следующим образом: *GET https://domain.com/vm/v3/cluster?where=(id+EQ+1)*.

Для выполнения API-запросов обязательна авторизация. Основной механизм – получение токена через POST-запрос с передачей email и пароля. Полученный токен используется в заголовке x-xsrf-token для всех последующих запросов. По умолчанию время жизни токена составляет 60 минут.

Ansible реализует декларативный подход к управлению конфигурациями. Архитектура Ansible включает управляющий узел, управляемые узлы (не требуют установки агентов), инвентарь, модули, плейбуки (файлы на YAML) и роли. Для взаимодействия с VMmanager Ansible может использовать встроенный модуль uri для прямых HTTP-запросов или пользовательские модули на Python, инкапсулирующие логику работы с API.

Документация VMmanager описывает несколько IaC-решений: сценарии развертывания с помощью Ansible, провайдер Terraform и непосредственную работу с API. В январе 2026 года вышла Ansible-коллекция для VMmanager в составе платформы Astra Automation, позволяющая централизованно управлять установкой платформы, жизненным циклом виртуальных машин, настройками сети и пользователями (рис. 1).

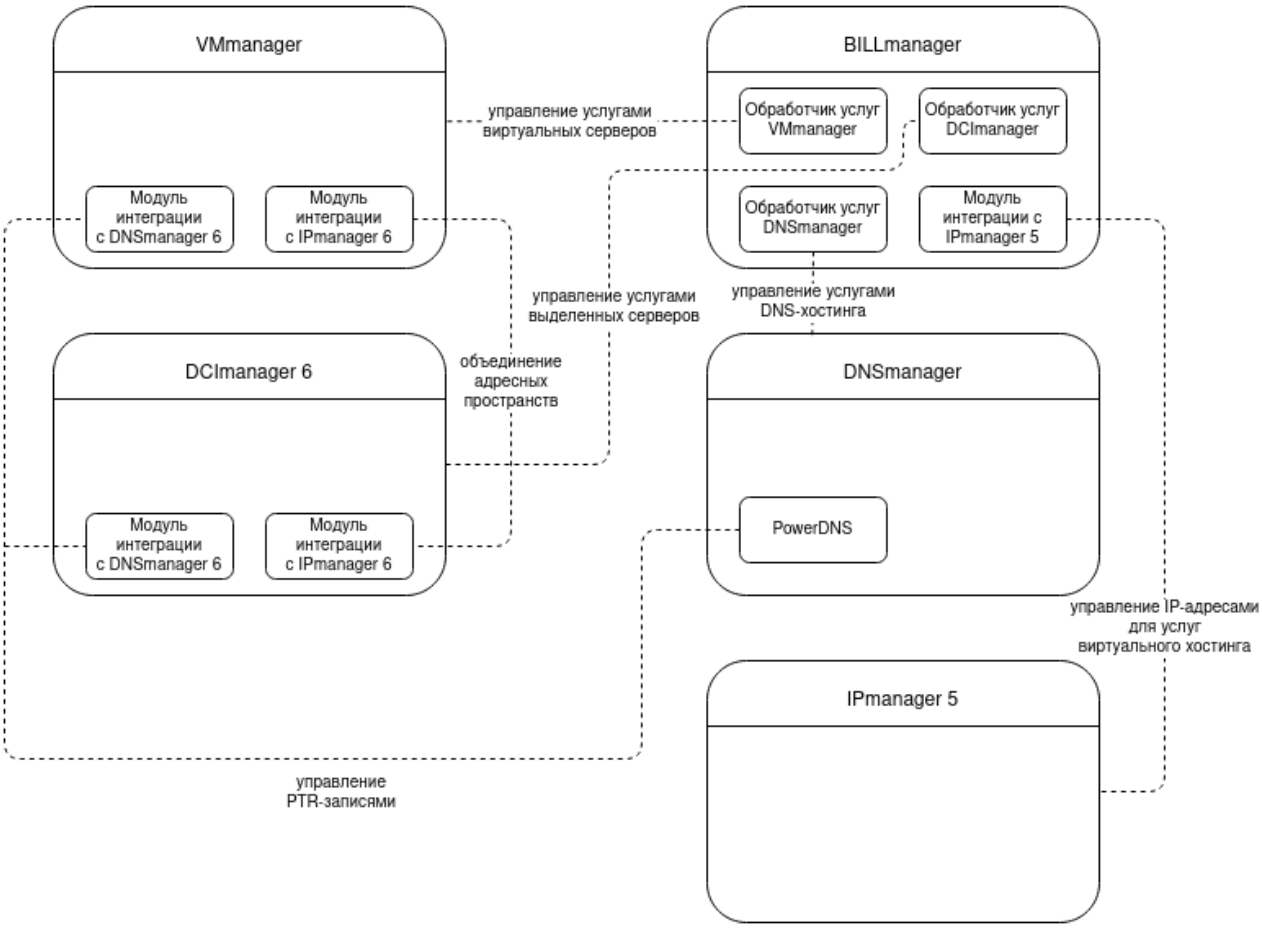


Рисунок 1. Структура использования VMmanager

VMmanager – один из продуктов ISPsystem, он имеет интеграцию с другими продуктами, на схеме кратко и просто представлена их взаимосвязь [2].

ПРАКТИЧЕСКИЙ ОПЫТ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ИНФРАСТРУКТУРОЙ НА БАЗЕ VMMANAGER

В хостинговой компании с парком из 350 виртуальных машин и штатом из 5 администраторов было проведено внедрение автоматизации на базе VMmanager и Ansible. До внедрения среднее количество операций в день составляло 45, все операции выполнялись через веб-интерфейс VMmanager.

Основные проблемы до внедрения автоматизации включали высокую нагрузку на администраторов при выполнении рутинных операций, ошибки человеческого фактора при ручном вводе параметров, невозможность быстрого масштабирования при пиковых нагрузках и отсутствие версионирования конфигураций.

Внедренное решение представляло собой комплекс Ansible-плейбуков, автоматизирующих создание типовых конфигураций виртуальных машин (5 шаблонов), изменение ресурсов ВМ, управление

сетевыми настройками, массовое обновление конфигураций, резервное копирование и восстановление. Через 6 месяцев после внедрения было зафиксировано сокращение времени выполнения рутинных операций на 73%, снижение количества ошибок при создании ВМ на 89%, возможность выполнения до 150 операций в день без привлечения дополнительного персонала и полная прослеживаемость изменений благодаря хранению плейбуков в Git.

Для автоматизированной установки VMmanager используются сценарии Ansible, доступные на официальном сайте. Процесс включает подготовку сервера с Astra Linux, настройку параметров установки (учетные данные администратора, лицензионный токен, параметры сети, название кластера) и запуск плейбука, который выполняет установку пакетов, настройку репозиториев, развертывание компонентов, создание кластера, настройку сети и резервного копирования.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ

Для количественной оценки эффективности автоматизированного подхода было проведено сравнение временных затрат на выполнение типовых операций администрирования тремя способами: ручное управление через веб-интерфейс VMmanager, использование скриптов на Python и использование Ansible-модулей (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение времени выполнения операций (в секундах)

Операция	Веб-интерфейс	Python-скрипт	Ansible	Экономия
Создание одной ВМ	185	162	158	14,6%
Создание 5 ВМ последовательно	910	815	790	13,2%
Создание 5 ВМ параллельно	910	815	245	73,1%
Удаление 5 ВМ	210	85	82	60,9%
Изменение ресурсов для 3 ВМ	450	210	195	56,7%
Массовое обновление сети (10 ВМ)	850	320	45	94,7%

Наибольший выигрыш достигается при выполнении массовых однотипных операций благодаря параллельному выполнению задач в Ansible. Для массового обновления сетевой конфигурации ускорение составило более 18 раз (табл. 2).

Таблица 2. Частота ошибок при выполнении операций (%)

Тип операции	Веб-интерфейс	Python-скрипт	Ansible
Создание ВМ	8	4	2
Изменение ресурсов	5	3	1
Удаление ВМ	3	2	0
Настройка сети	12	6	3

Общее количество ошибок при использовании Ansible снижается в 3-4 раза по сравнению с ручным управлением. Основная доля приходится на технические сбои, тогда как ошибки человеческого фактора практически исключаются благодаря автоматизации и идемпотентности операций.

Для оценки экономической эффективности был произведен расчет на основе данных о затратах времени администраторов. При средней стоимости часа работы администратора 1500 рублей, ежемесячная экономия составляет 27 090 рублей, годовая экономия – 325 080 рублей. Затраты на внедрение (разработка плейбуков, обучение, тестирование) составили 204 000 рублей, срок окупаемости – 7,5 месяцев.

Помимо количественных показателей, внедрение автоматизации обеспечивает качественные улучшения: стандартизация конфигураций, исключающая дрейф конфигураций; воспроизводимость среды, позволяющая восстановить инфраструктуру из описаний в случае катастрофы;

документирование как побочный эффект, где плейбуки выступают исполняемой документацией; интеграция с DevOps-процессами и реализация концепции GitOps [3].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ

Для подтверждения теоретических выводов, сделанных в предыдущих главах, был проведен эксперимент. Цель эксперимента – сравнить временные и качественные показатели управления виртуальной инфраструктурой VMmanager при ручном администрировании через веб-интерфейс и при использовании разработанного Ansible-модуля.

УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА:

1.Создание идентичных виртуальных машин с параметрами: 2 vCPU, 4 GB RAM, 50 GB HDD;

2.ОС шаблона – Ubuntu 22.04;

3.Количество создаваемых ВМ – 3;

4.Фиксация времени выполнения операции и количества ошибок.

Для проведения эксперимента был разработан пользовательский модуль Ansible на языке Python, реализующий базовые операции с VMmanager API.

Листинг 1. Фрагмент модуля vmmanager_vm.py (функция создания виртуальной машины)

```
def create_vm(api_url, token, params):
    headers = {
        'X-XSRF-Token': token,
        'Content-Type': 'application/json'
    }
    vm_url = f"{api_url}/vm/v3/host"
        payload = {
        "name": params['name'],
        "cpu": params['cpu'],
        "ram": params['ram_mb'],
        "disk": params['disk_gb'] * 1024,
        "cluster_id": params['cluster_id'],
        "account_id": params['account_id']
    }
        response = requests.post(vm_url, headers=headers, json=payload)
    return response
```

Через веб-интерфейс VMmanager были последовательно созданы 3 виртуальные машины (рис. 2).

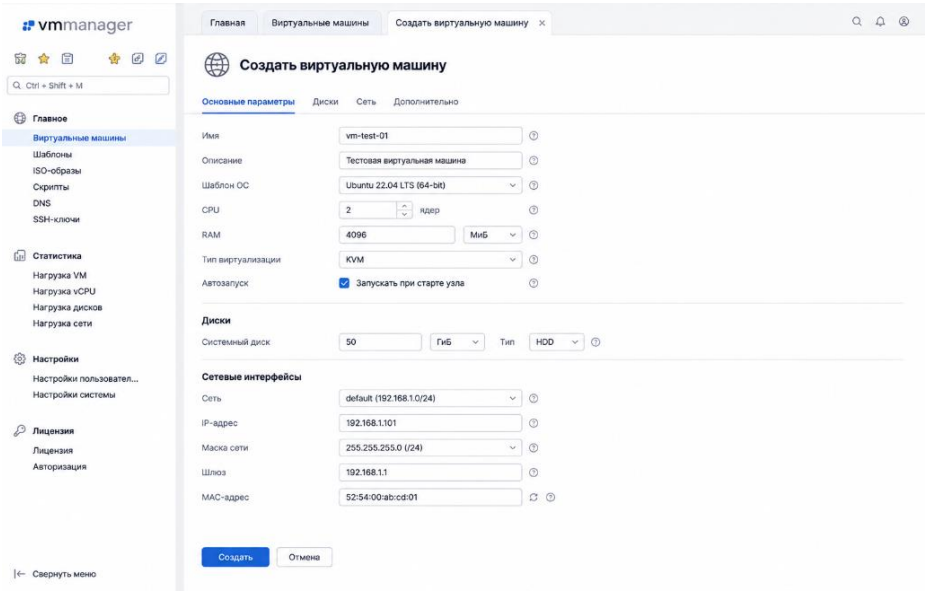


Рисунок 2. Фрагмент веб-интерфейса в момент заполнения параметров ВМ

С использованием разработанного Ansible-модуля были созданы 3 виртуальные машины с аналогичными параметрами (рис. 3).

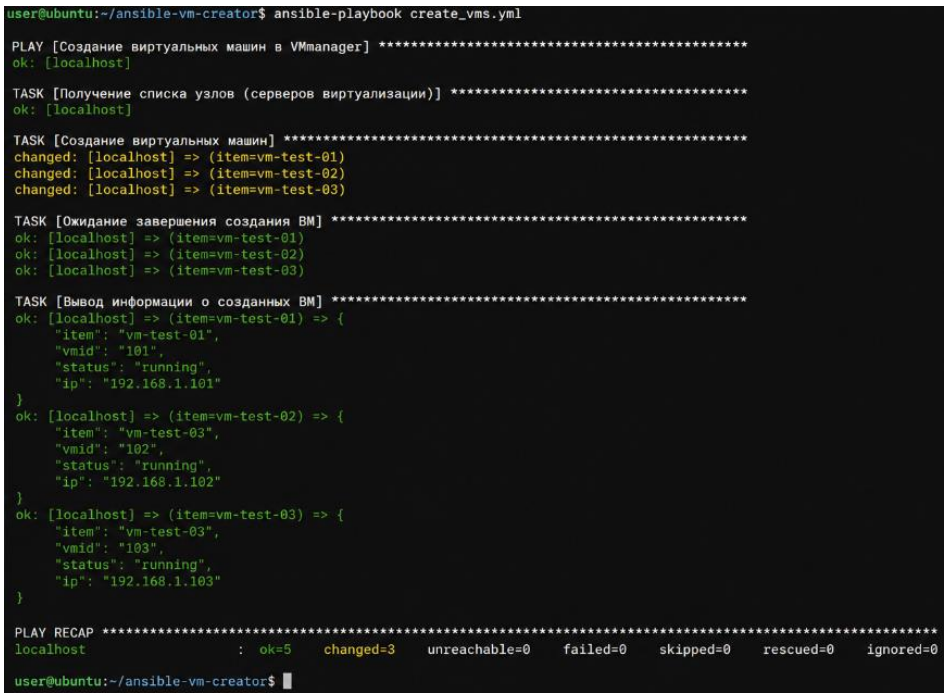


Рисунок 3. Выполнение Ansible playbook для автоматического создания ВМ

Автоматизация на базе Ansible обеспечивает сокращение времени создания одной виртуальной машины на 77% по сравнению с ручным управлением. Также, при использовании Ansible ошибки полностью исключены благодаря декларативному описанию параметров в файле переменных. Результат ручного управления существенно зависит от квалификации и внимательности администратора. Результат автоматизированного управления абсолютно воспроизводим – запуск одного и того же playbook всегда приводит к созданию идентичных ВМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполненного исследования была подтверждена эффективность интеграции платформы управления виртуализацией VMmanager с системой управления конфигурациями Ansible. Разработанный подход к автоматизации позволяет существенно сократить временные затраты на

выполнение рутинных операций администрирования (до 94% для массовых задач) и минимизировать количество ошибок, связанных с человеческим фактором.

Ключевыми результатами работы являются анализ архитектуры VMmanager API и механизмов авторизации, необходимых для программного управления платформой; анализ практического опыта автоматизации в хостинговой компании; количественная оценка эффективности предложенного подхода, подтвержденная экспериментальными данными [4].

Практическая значимость работы заключается в возможности непосредственного применения разработанных подходов в организациях, использующих VMmanager для управления виртуальной инфраструктурой. Особую актуальность это приобретает в контексте импортозамещения и перехода на российское программное обеспечение [5].

ЛИТЕРАТУРА

[1] ISPsystem. Документация VMmanager: Работа с API [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.ispsystem.ru/docs/vmmanager-admin/razrabotchiku/rabota-s-api.

[2] RUSSOFT. Автоматизация инфраструктуры стала удобнее: клиентам Astra Automation доступна Ansible-коллекция для управления VMmanager [Электронный ресурс]. – 2026. – Режим доступа: https://russoft.org/news/avtomatizatsiya-infrastruktury-stala-udobnee-klientam-astra-automation-dostupna-ansible-kollektsiya-dlya-upravleniya-vmmanager/.

[3] Лоусон, М. Изучаем Ansible. – М.: ДМК Пресс, 2019. – 432 с.

[4] Astra Linux Wiki. Работа с API VMmanager [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://wiki.astralinux.ru/ispsystem/vmmanager-admin/rabota-s-api.

[5] ISPsystem. Документация VMmanager: Установка с помощью Ansible [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.ispsystem.ru/docs/vmmanager-admin/iac-resheniya/ustanovka-s-pomoshch-yu-ansible.

AUTOMATION OF VIRTUAL INFRASTRUCTURE MANAGEMENT BASED ON VMMANAGER USING ANSIBLE

A.D. Streltsov, G.A. Piskun

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
strelsov92@gmail.com

Abstract: the article addresses the problem of automating virtual infrastructure management on the VMmanager platform. The technological foundations of integrating the VMmanager API with the Ansible configuration management system are analyzed, including the API architecture, authorization mechanisms, and existing Infrastructure as Code solutions. Practical experience of implementing automation in a hosting company with a fleet of 350 virtual machines is presented. A quantitative assessment of the automated approach's effectiveness is performed by comparing time costs and error rates for manual management through the web interface, using Python scripts, and applying Ansible modules. The research results demonstrate a reduction in execution time for mass operations of up to 94%, a decrease in error rates by 3-4 times, and economic efficiency with a payback period of 7.5 months. A conclusion is drawn about the practical significance of automation for organizations using VMmanager in the context of import substitution.

Keywords: VMmanager, Ansible, automation, Infrastructure as Code, IaC, virtual infrastructure management, API, REST API, KVM, virtualization, DevOps, idempotence, orchestration, Astra Linux, ISPsystem, configuration management, automation efficiency.

УДК 004.896:621.3.049.77

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ БАЗЫ ДАННЫХ IMEI-КОДОВ МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Давронбеков Д.А., Исроилов Ж.Д.

Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий, Ташкент, Узбекистана, jamshid.isroilov@gmail.com

Аннотация: в работе рассматривается подход к формированию базы данных IMEI-кодов мобильных устройств с использованием методов искусственного интеллекта. В отличие от традиционного формирования реестров, основанного преимущественно на структурной и справочной проверке записей, предлагается дополнительно учитывать взаимосвязь IMEI с атрибутами мобильного оборудования и параметрами зарегистрированных событий. Сформирована структура входных данных, включающая идентификатор устройства, TAC, сведения о производителе и модели, временные характеристики и параметры регистрации. Предложена последовательность предварительной обработки данных, формирования признакового пространства и интеллектуальной оценки качества записей. Практическая значимость подхода заключается в возможности автоматизации выявления неполных, противоречивых и аномальных записей при формировании централизованной базы данных.

Ключевые слова: IMEI, база данных, искусственный интеллект, TAC, мобильное устройство, качество данных, аномалия, телекоммуникационная сеть

I. ВВЕДЕНИЕ

IMEI (International Mobile Equipment Identity) является идентификатором мобильного оборудования, используемым мобильными сетями для идентификации устройства. Согласно материалам GSMA, IMEI представляет собой 15-значный идентификатор, а TAC используется для идентификации типа, производителя и модели мобильного устройства. GSMA также поддерживает глобальные сервисы, связанные с распределением TAC, сведениями об устройствах и статусом идентификаторов [1].

В современных мобильных сетях количество устройств и объём формируемых служебных данных постоянно увеличиваются. В связи с этим база данных IMEI должна рассматриваться не только как совокупность идентификаторов, но и как информационная система, обеспечивающая хранение, проверку и актуализацию взаимосвязанных сведений о мобильном оборудовании.

Традиционный подход к формированию базы данных предполагает выполнение детерминированных операций: проверку длины IMEI, контроль контрольной цифры, определение TAC и сопоставление идентификатора со справочными сведениями о производителе и модели. Однако такие проверки не позволяют в полной мере оценить качество записи в случае наличия неполных, противоречивых или нетипичных комбинаций атрибутов.

В этой связи особое значение приобретает интеллектуальный анализ совокупности характеристик IMEI-записей, позволяющий учитывать не только их формальную корректность, но и структурные, справочные, статистические и временные взаимосвязи. Применение методов искусственного интеллекта в данном случае позволяет перейти от отдельных процедур проверки к комплексной оценке качества записей и автоматизированному выявлению отклонений от установленных характеристик информационной базы [2].

Предлагаемый подход ориентирован на формирование концептуальной модели базы данных IMEI-кодов, в которой процедуры предварительной обработки и валидации дополняются интеллектуальным анализом признакового пространства. Такая организация обработки обеспечивает классификацию записей по степени соответствия заданным требованиям, выявление потенциально аномальных данных и повышение достоверности формируемой базы данных.

Базовой единицей предлагаемой информационной модели является запись о мобильном устройстве:

$$D_i=\{I_i,T_i,M_i,R_i,E_i,Q_i\}, \quad (1)$$

где I_i - IMEI устройства; T_i - TAC; M - сведения о производителе и модели; R_i - регистрационные параметры; E_i- временные и сетевые характеристики зарегистрированных событий; Q_i- показатели качества записи [1-7].

Структура IMEI может быть представлена следующим образом: *IMEI=TAC‖SNR‖CD,* где *TAC* - Type Allocation Code, *SNR* - серийная часть идентификатора, *CD* - контрольная цифра, а символ ‖обозначает конкатенацию полей.

GSMA указывает, что TAC имеет длину 8 цифр, после него следуют 6 цифр серийного номера, а последняя цифра IMEI используется как контрольная цифра.

Для каждой записи базы данных целесообразно хранить не только сам IMEI, но и дополнительные атрибуты:

$$X_i=\{TAC_i,SNR_i,V_i,M_i,C_i,t_i,L_i,S_i\}, \quad (2)$$

где *Vi* - версия программного обеспечения устройства, C_i - класс устройства, t_i - временная характеристика, L_i - информация о зоне регистрации, S_i - параметры источника данных.



Рисунок 1. Общая архитектура использования искусственного интеллекта при формировании базы данных IMEI-кодов мобильных устройства

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Такое представление позволяет перейти от простой таблицы идентификаторов к структурированной модели данных.

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Предлагаемый подход состоит из четырёх последовательных этапов:

1. получение и структурирование исходных данных;
2. детерминированная предварительная проверка;
3. формирование признакового пространства;
4. интеллектуальная оценка качества записи.

На первом этапе из различных источников формируется массив записей

$$D=D=\{D_1,D_2,\ldots,D_N\}. \quad (3)$$

В качестве признакового пространства используются структурные, справочные, информационные, статистические и временные характеристики записей базы данных IMEI. Они отражают корректность структуры идентификатора, соответствие IMEI и TAC справочным сведениям, полноту и согласованность атрибутов мобильного устройства, а также характеристики частоты и динамики регистрационных событий. Совокупность указанных признаков позволяет комплексно оценивать качество информационных записей и формировать входные данные для интеллектуальной модели классификации и выявления аномальных записей [3,5].

Для оценки качества записи может использоваться интеллектуальная модель:

$$S_i=f_\theta(F_i), \quad (4)$$

где f_θ - обученная модель искусственного интеллекта, а S_i - итоговая оценка записи.

Для практической реализации могут рассматриваться методы классификации, кластеризации или обнаружения аномалий. Выбор конкретного алгоритма должен определяться доступностью размеченной выборки. При наличии классов «корректная запись» и «некорректная запись» возможно применение контролируемого обучения. При отсутствии достоверной разметки более рациональным является использование методов unsupervised anomaly detection.

АЛГОРИТМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ФОРМИРОВАНИЯ БАЗЫ

Предлагаемый алгоритм можно представить следующей последовательностью:

$$D_i \rightarrow Preprocessing \rightarrow Validation \rightarrow Feature\ Extraction \rightarrow AI \rightarrow S_i \rightarrow Database.$$

На этапе предварительной обработки выполняются удаление дубликатов записей, нормализация полей, обработка пропущенных значений и приведение данных к единому формату.

После этого осуществляется детерминированная проверка IMEI. Записи, не соответствующие обязательным структурным требованиям, направляются на дополнительную проверку.

Важным является то, что AI-модель в предлагаемой архитектуре не заменяет нормативную проверку IMEI. Она выполняет дополнительную функцию интеллектуального контроля качества данных.

Таким образом, логика обработки имеет два уровня:

IMEI→формальная проверка→интеллектуальная проверка→решение о качестве записи.

Такое разделение позволяет избежать ситуации, при которой статистическая модель самостоятельно определяет нормативную корректность идентификатора. Предлагаемый подход изменяет принцип формирования базы данных IMEI с преимущественно статического хранения идентификаторов на интеллектуальный контроль качества информационных записей.

Особенностью модели является совместное использование детерминированных и интеллектуальных методов. Детерминированный уровень обеспечивает соблюдение формальных требований к идентификатору, тогда как AI-уровень анализирует многомерные зависимости между атрибутами записи.

Таблица 1. Структура полей и признаков базы данных IMEI-кодов мобильных устройств

Группа	Примеры данных
Идентификация	IMEI, TAC, SNR
Устройство	производитель, модель, тип
Программное обеспечение	версия ПО
Регистрация	дата, время, параметры события
Источник	источник формирования записи
Контроль	результаты формальной проверки
AI-анализ	признаки, оценка S_i класс
Состояние	подтверждённая, требующая проверки, аномальная

Такое представление согласуется с общей логикой современных систем управления идентификаторами устройств. GSMA Device Registry, например, предназначен для ведения сведений о TAC и глобального списка идентификаторов устройств, имеющих определённый статус.

При этом разработанный в работе подход следует рассматривать как надстроечный аналитический механизм, а не как замену существующих процедур управления IMEI [6,7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена задача формирования базы данных IMEI-кодов мобильных устройств с применением методов искусственного интеллекта. Показано, что традиционная проверка структуры IMEI является необходимой, но недостаточной для комплексной оценки качества информационной записи.

Предложена структурная модель записи, включающая идентификатор устройства, TAC, сведения о производителе и модели, регистрационные параметры и признаки качества данных. Разработана

последовательность обработки, объединяющая предварительную обработку, формальную валидацию, формирование признакового пространства и интеллектуальную классификацию.

Основным результатом является модель двухуровневого контроля, в которой нормативные проверки выполняются детерминированными процедурами, а методы искусственного интеллекта используются для выявления неполных, противоречивых и статистически нетипичных записей.

Дальнейшее исследование целесообразно направить на формирование экспериментальной выборки реальных регистрационных данных, сравнительную оценку алгоритмов Random Forest, Gradient Boosting, Isolation Forest и нейросетевых методов, а также определение показателей Precision, Recall, F1-score и ROC-AUC для количественной оценки эффективности предлагаемого подхода.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность специалистам в области мобильных телекоммуникационных систем за консультации при формировании структуры исследуемых данных и постановке задачи контроля качества базы данных IMEI-кодов.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Eoghan Casey. Handbook of Digital Forensics and Investigation. – Copyright Eoghan Casey. Published by Elsevier Inc. - 2010 – 559 p.

[2] Raj, Tilak. (2025). IMEI: An Essential Resource for Device Identification and Security. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology. 13. 1368-1370. 10.22214/ijraset.2025.67560.

[3] М.С.Лохвицкий, Н.С.Мардер. Сотовая связь: от поколения к поколению. - М. Издательство ИКАР. - 2014 - 236 с.

[4] Д.Давронбеков, А.Кириакиди, Д.Елькин, Ж.Исроилов, М.Нурматова. Состояние и анализ рынка мобильных устройств для создания единой базы идентификации мобильных устройств по IMEI // International Scientific Journal«Science and World». - 2018. - №11(63). Vol.I. - P. 41-42.

[5]D. A. Davronbekov, J. D. Isroilov and B. I. Akhmedov, "Principle Of Organizing Database Identification On Mobile Devices By IMEI," 2019 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT),Tashkent, Uzbekistan, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICISCT47635.2019.9012000.

[6] Д.Давронбеков, К.Абдурахманов, З.Хакимов, Ж.Исроилов, А.Кириакиди, Д.Елькин. Некоторые вопросы регистрации и учета мобильных устройств по IMEI // International Scientific Journal «Science and World». -2019.-№8(72)-P.27-29

[7] Давронбеков Д., Исроилов Ж., Архитектура организации регистрации IMEI-кодов в базе данных информационной системы идентификации мобильных устройств //Наука и мир. - 2020. -№.10.-С.39-43.

USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO BUILD A MOBILE DEVICE IMEI DATABASE

D. Davronbekov, J. Isroilov

Muhammad al-Khwarizmi Tashkent University of Information Technologies, Tashkent, Uzbekistan,
jamshid.isroilov@gmail.com

Abstract: this paper examines an approach to building a mobile device IMEI database using artificial intelligence methods. Unlike traditional registry creation, which relies primarily on structural and reference-based record validation, this approach proposes also considering the relationships between the IMEI and mobile equipment attributes as well as registered event parameters. An input data structure has been defined, comprising the device identifier, TAC, manufacturer and model details, timing characteristics, and registration parameters. A sequence is proposed for data preprocessing, feature space construction, and intelligent record quality assessment. The practical significance of this approach lies in the ability to automate the detection of incomplete, inconsistent, and anomalous records during the creation of a centralized database.

Keywords: IMEI, database, artificial intelligence, TAC, mobile device, data quality, anomaly, telecommunications network.

UDC 621.3.049.77-047.56

ADAPTIVE OPTIMIZATION OF RING OSCILLATORS BASED ON PROCESS-CIRCUIT CO-DESIGN

Qisheng Liu, Kang Li

Xidian University, Xi'an, Shaanxi, China, 2562397701@qq.com

Abstract: as CMOS technology approaches its physical and economic limits, Design-Technology Co-Optimization (DTCO) has become a critical approach to tapping circuit potential within a constrained process window. Targeting ring oscillators (ROs), this paper proposes an adaptive process-circuit co-optimization scheme. A parameter-exploration framework is established using a multi-objective composite reward function and an improved greedy genetic algorithm. Source/drain extension (EXT) doping is adopted as a low-risk tuning knob, and a staged quantitative-loss-function-driven BSIM4 model extraction strategy is employed to achieve high-fidelity mapping from TCAD to SPICE. Simulation results show that an approximately 6% increase in EXT doping yields a 10.76% rise in RO frequency and an around 11% improvement in the energy-delay product (EDP). The proposed method can substantially enhance circuit performance under a controllable power budget and is applicable to other advanced process nodes.

Keywords: DTCO; Ring Oscillator; Genetic Algorithm; BSIM4 Model.

I. INTRODUCTION

As CMOS technology continues to scale down, device non-ideal effects and process variations exert growing impacts on circuit performance. The conventional sequential design paradigm, which fixes process parameters prior to circuit optimization, suffers from limitations including narrow optimization headroom and non-reproducible performance-power-reliability trade-offs. By introducing design feedback at the early stage of process development to realize joint optimization of devices, processes and circuits, Design-Technology Co-Optimization (DTCO) has emerged as a core solution to address these challenges [1].

Ring oscillators (ROs) are highly sensitive to process parameters. Their key metrics such as frequency, delay and power consumption are directly determined by physical quantities including drive current and parasitic resistance-capacitance [2]. Unlike digital circuits, analog circuits have little structural redundancy, making it difficult to compensate for performance degradation induced by process non-idealities through circuit-level design [3]. Consequently, ROs are widely adopted as benchmark circuits for process-performance evaluation and can readily reveal bottlenecks in conventional design flows.

This paper presents an adaptive design-space-exploration framework integrating process tuning, model fitting and circuit optimization. A closed-loop optimization flow for process parameters guided by circuit performance is established, and a staged high-precision model-fitting algorithm is adopted to improve accuracy in critical steps. Simulation validation on a 55 nm-process RO demonstrates that EXT doping optimization delivers prominent performance gains, and the proposed method can be migrated to advanced nodes such as FinFET.

The main contributions of this work are summarized as follows:A process-circuit adaptive closed-loop optimization method for ROs, with EXT doping as the core tuning knob, is constructed as illustrated in Figure 1;A genetic-algorithm search scheme guided by a composite reward function is proposed to achieve fast convergence of performance metrics;A staged parameter-fitting method is developed, which matches IV/CV characteristics sequentially following physical hierarchies to realize high-accuracy model calibration.

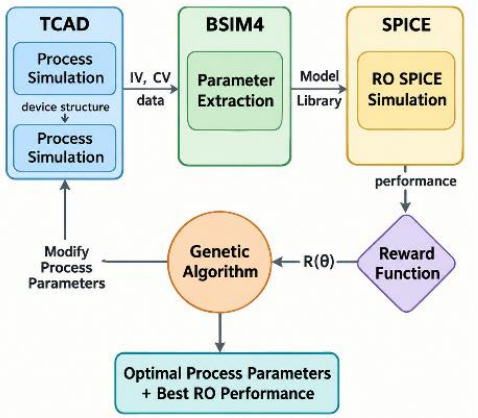


Figure 1. DTCO optimization framework

II. PROBLEM DEFINITION AND CORE ALGORITHM

A. Delay Model of the Ring Oscillator

A ring oscillator (RO) is formed by closing a loop with an odd number of inverter stages. Its oscillation frequency provides a direct measure of transistor switching speed. Given an RO with N inverter stages, its oscillation period and frequency are expressed as (1) and (2):

$$T \approx 2N \cdot t_{delay}, \tag{1}$$

$$f = \frac{1}{T} \approx \frac{1}{2N \cdot t_{delay}}. \tag{2}$$

The single-stage delay t_{delay} can be further modeled as (3):

$$t_{delay} \propto \frac{C_{eff} \cdot \Delta V}{I_{d,eff}}, \tag{3}$$

whereC_{eff} is the effective load capacitance and $I_{d,eff}$ is the effective drive current.

In addition, to evaluate the combined performance–power metric of the ring oscillator, the energy-delay product (EDP) is defined as (4):

$$EDP = \frac{P_{total}}{f^2}. \tag{4}$$

B. Key Physical Quantities Dominating RO Performance

The performance of an RO is mainly governed by the drive current I_d and effective capacitance C_{eff}. I_d directly determines the charge-discharge rate and represents the most effective means to boost frequency, whereas C_{eff} is constrained by device architecture and offers limited room for optimization.

At fixed supply voltage and device dimensions, reducing the source/drain series resistance R_s/R_d can directly increase I_d and improve the RO frequency [4]. This effect outperforms merely optimizing carrier mobility or threshold voltage. According to the MOSFET current model, R_s limits the current by reducing the effective gate overdrive voltage [5]:

$$V_{gs,eff} = V_{gs} - I_d \cdot R_s. \tag{5}$$

Parasitic resistance decomposition reveals that the source/drain extension (EXT) region accounts for the major portion of Rs/Rd owing to its low doping concentration. Increasing the EXT doping dosage reduces the resistivity of the extension region and selectively lowers Rs/Rd. It introduces little perturbation to thermal budget, short-channel effects and leakage current, and therefore serves as a low-risk tuning knob [6,7]. For this reason, EXT doping is selected as the core optimization parameter in this work.

C. Adaptive Optimization Strategy Based on Improved Greedy Genetic Algorithm

EXT doping adjustment is constrained by manufacturing feasibility and reliability. Excessively high doping aggravates short-channel effects, increases leakage current, and degrades performance trade-offs. In this work, the safe window for EXT doping is set to 10 % of the baseline value, where risks remain controllable.

To perform optimization within this limited window, a composite reward function R(θ) is introduced, where θ covers the arsenic dosage of NMOS and boron dosage of PMOS, to integrate multiple objectives and process constraints into a single scalar quantity:

$$R(\theta) = w_1 * \left(\frac{f_\theta}{f_{base}} - 1\right) - w_2 * \left(\frac{P_\theta}{P_{base}} - 1\right) - w_3 * \left(\frac{EDP_\theta}{EDP_{base}} - 1\right) - w_4 * \left(\frac{I_{off,\theta}}{I_{off,base}} - 1\right) - \lambda * C(\theta), \tag{6}$$

where w_1,w_2,w_3,$w_4$denote the respective weighting coefficients. This composite reward function explicitly integrates multiple objectives (frequency improvement, power and EDP control, leakage suppression) and process constraints into a single scalar metric, providing clear “good/bad” feedback for the genetic algorithm.

λ acts as a trade-off coefficient to balance performance gain and penalty strength. $C(\theta)$ denotes the penalty term for process constraints, which is described by the following formula:

$$C(\theta) = max(0, \Delta dose - 10\%)^2, \tag{7}$$

where Δdose is the relative dose change in percentage (%). The quadratic penalty form ensures mild deduction just beyond 10% and sharply increasing penalties for severe overruns, thereby keeping the search consistently within the low-risk region.

To achieve efficient search under this reward function, we adopt a variant of the greedy genetic algorithm as the intelligent decision-making mechanism for the DTCO closed-loop. This algorithm continuously generates new solutions around the current optimal individual and strictly preserves elite candidates, realizing targeted and adaptive optimization with minimized computational cost. Its detailed workflow is illustrated in Figure 2:

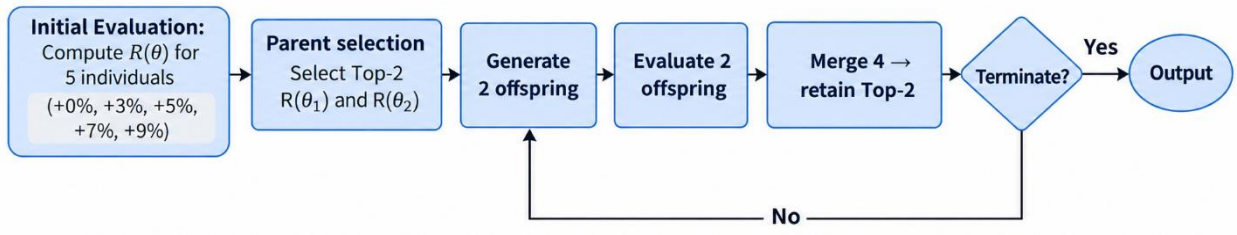


Figure 2. Flowchart of the genetic algorithm

Reward function values are first calculated for five sets of gradient-based initial doping ratios, and the top-two candidates are selected as parents. After generating and evaluating two offspring, parents and offspring are combined, and only the top-two elite individuals are retained. If the termination condition is satisfied, the optimal solution is output; otherwise, the iteration continues. Adopting a small-population elite strategy, this algorithm fits well with high-cost simulation scenarios and enables efficient convergence within the limited process window.

III. STAGED GOAL-ORIENTED BSIM4 MODEL EXTRACTION FRAMEWORK

High-fidelity TCAD-to-SPICE model transfer constitutes the essential foundation for iterative DTCO closed-loop operation. Following each adjustment of process parameters, accurate BSIM4 models must be rapidly generated to guarantee the credibility of circuit-level simulation. To address the drawbacks of conventional manual extraction, including abundant strongly-coupled BSIM4 parameters, low efficiency and unsatisfactory precision, this chapter proposes a staged goal-oriented quantitative extraction strategy to provide efficient and high-accuracy model support for the DTCO closed loop.

A. Staged Quantitative Extraction Framework

This paper performs step-by-step fitting following the device-physics hierarchy: threshold region → current-transport region → parasitic-capacitance region. Upon the completion of each stage, the converged parameters of the current stage are frozen, and only the corresponding parameter subset for the next stage is optimized. Such operation realizes parameter decoupling and balances fitting accuracy and convergence efficiency. Target data for extraction are derived from TCAD-simulated I_d-V_g,I_d-V_d and C-V curves, which fully cover both DC and AC device characteristics. Only the parameter subsets relevant to the dominant physical quantities at the current stage are optimized, with weighted root-mean-square error (RMSE) adopted as the unified loss function:

$$L = \Sigma w_i * RMSE\left(y_{i,model} - y_{i,target}\right). \quad (8)$$

The Levenberg-Marquardt algorithm is selected as the optimization algorithm to minimize the loss function in each stage. The loss function takes the form of weighted RMSE, where weights are configured according to the precision tolerance of each SPEC.

B. Model Extraction Results and Validation

To verify the effectiveness of the staged tuning strategy, precision evaluation was performed on the BSIM4 models for both NMOS and PMOS using RMS error as the quantitative metric. The evaluation covers threshold voltage, current characteristics, and capacitance characteristics. All SPEC values are based on TCAD simulation or target data.

Tables 1 and 2 present the SPEC accuracy results for the NMOS and PMOS models, respectively. All key metrics exhibit RMS errors controlled at low levels, meeting industrial-grade model accuracy requirements.

Table 1. NMOS model SPEC Accuracy

SPEC	Vtgm	Vtlin	Vtsat	Idlin	Idsat	Ioff	Id1	Id2	Id3	Cgg	Cgg0	Cgginv
RMS	1.4mV	8.9mV	0.03mV	0.13%	2.69%	7.31%	1.35%	3%	4.77%	2.22%	0.25%	0.1%

Table 2. PMOS Model SPEC Accuracy

SPEC	Vtgm	Vtlin	Vtsat	Idlin	Idsat	Ioff	Id1	Id2	Id3	Cgg	Cgg0	Cgginv
RMS	14.4mV	1.8mV	16.5mV	1%	2.81%	3.2%	4.81%	6.82%	4.05%	1.26%	2.83%	2.27%

To further visually validate the model extraction accuracy, Fig. 3 shows the Id-Vgs curve matching results for a typical NMOS device (W = 1.000 μm, L = 0.0550 μm, T = 27.0 °C) in the linear region (Vds = 0.05 V) and saturation region (Vds = 1.4 V).

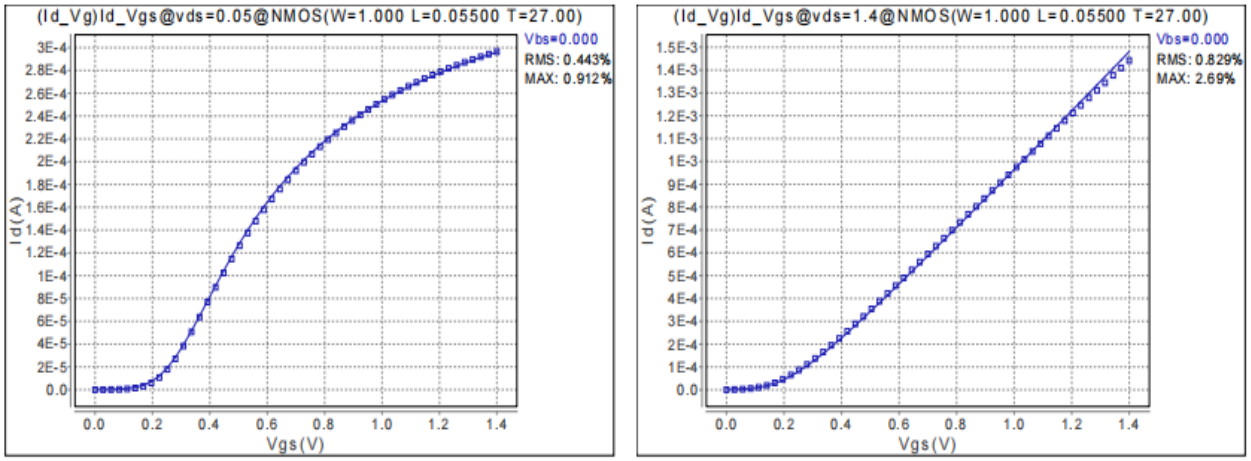


Figure 3. NMOS device Id-Vgs curve model matching results. (Left: linear region, Vds = 0.05 V; Right: saturation region, Vds = 1.4 V). Blue points represent TCAD target data; solid red lines represent BSIM4 model simulation results

IV. CONCLUSION

The DTCO closed-loop framework constructed in this paper uses the composite reward function R(θ) and the genetic algorithm as its core, performing parameter search within a 10% safe EXT doping window. The optimization process starts from selected initial parameter combinations and, through multiple generations of genetic algorithm evolution, progressively discovers better solutions in the surrounding parameter space, ultimately converging to an EXT doping increase of approximately 6%.

TCAD simulation results show that after an approximately 6% increase in EXT doping concentration, the linear drive current I_{dlin} and saturation drive current I_{dsat} of PMOS increase by 3.17% and 3.91%, respectively. For NMOS, I_{dlin} and I_{dsat} rise by 0.94% and 0.55%.

Based on the high-precision BSIM4 model, we evaluate the impact of EXT doping optimization on RO performance. The comparison between the pre-optimization and post-optimization results is shown in the table 3 below:

Table 3. Optimization Results

Metric	Before Optimization	After Optimization	Change
Frequency (GHz)	1.117	1.237	+10.76%
Total Power (W)	0.001	0.001091	+9.10%
EDP(J·s)	8.014×10^{-22}	7.130×10^{-22}	−11.04%

With the EXT doping variation kept within the process safety window, the proposed method reduces the parasitic resistance of source/drain extension regions to boost device drive current and RO oscillation frequency. After optimization, the RO frequency increases by 10.76%, the total power consumption rises by 9.10%, and the EDP decreases by approximately 11.04%. This demonstrates that the proposed process-model-circuit closed-loop optimization method can achieve favorable overall performance gains under controlled power growth.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was funded by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2022YFB 4400400). The research was supported by the Higher Education and Science Committee of MESCS RA (Research project 25RG-2B002).

REFERENCES

[1] Yuan L. What is DTCO?: an Introduction to design-technology co-optimization[J]. available atļ https://www. tsmc. com/chinese/news-events/blog-article-20220615, 2022.

[2] Gaddemane G, Schuddinck P, Bhuwalka K, et al. Comprehensive DTCO-Driven Power and Performance Optimization in Nanosheet and Forksheet Architectures: Influence of Dielectric Walls, Active Widths, and Power Delivery Methods[J]. Authorea Preprints, 2024.

[3] McConaghy T, Breen K, Dyck J, et al. Variation-aware design of custom integrated circuits: a hands-on field guide[M]. Springer Science & Business Media, 2012.

[4] Wang L T N. Design and measurement of parameter-specific ring oscillators[M]. University of California, Berkeley, 2010.

[5] Taur Y, Ning T H. Fundamentals of modern VLSI devices[M]. Cambridge university press, 2021.

[6] Balasinski A. Semiconductors: Integrated Circuit Design for Manufacturability[M]. CRC Press, 2018.

[7] Melikyan V, Balabanyan A, Hayrapetyan A, et al. NMOS/PMOS resistance calibration method using reference frequency[C]//Ninth International Conference on Computer Science and Information Technologies Revised Selected Papers. IEEE, 2013: 1-6.

Адаптивная оптимизация кольцевых генераторов на основе совместного проектирования технологического процесса и схемы

Qisheng Liu, Kang Li

Сианьский университет электронных наук и технологий, Сиань, Шэньси, Китай, 2562397701@qq.com

Аннотация: по мере того как КМОП-технологии приближаются к физическим и экономическим пределам, совместная оптимизация проектирования и технологического процесса (DTCO) становится ключевым подходом для раскрытия потенциала схем в рамках ограниченного технологического окна. В настоящей работе предложена адаптивная схема совместной технологической и схемной оптимизации для кольцевого генератора (RO): создан фреймворк поиска параметров на основе многокритериальной составной функции вознаграждения и модифицированного жадного генетического алгоритма. В качестве малорискованного регулятора используется легирование области расширения истока-стока (EXT). Применяется стратегия извлечения модели BSIM4, управляемая поэтапной квантифицированной функцией потерь, что обеспечивает высокоточное согласование между TCAD и SPICE. Моделирование показывает, что при увеличении концентрации легирующей примеси EXT примерно на 6 % частота кольцевого генератора возрастает на 10,76 %, а произведение энергии на задержку (EDP) улучшается приблизительно на 11 %. Данный метод позволяет значительно повысить производительность схемы при контролируемом бюджете мощности и подходит для других перспективных технологических узлов.

Ключевые слова: DTCO; кольцевой генератор; генетический алгоритм; модель BSIM4.

УДК 621.382

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРИБОРНЫХ СТРУКТУР МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Новиков Ф.П.[1], Лопатко А.И.[2], Стемпицкий В.Р.[1]

[1]Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, vstem@bsuir.by

[2]ГУО «Боровлянская средняя школа №2», Минск, Республика Беларусь

Аннотация: рассмотрены вопросы повышения адекватности компьютерного проектирования изделий микроэлектроники за счет предварительной статистической обработки экспериментальных данных, оптимизации и верификации параметров приборно-технологических моделей. Предложено использовать статистические методы и аппроксимационные зависимости для снижения затрат на натурные эксперименты и повышения достоверности результатов моделирования.
Ключевые слова: компьютерное проектирование, микроэлектроника, статистический анализ, оптимизация, верификация моделей, сквозной цикл проектирования, SPICE-параметры, аппроксимация, Монте-Карло.

I. ВВЕДЕНИЕ

Современное состояние микроэлектроники характеризуется неуклонным повышением сложности и стоимости разработки интегральных микросхем (ИМС), снижением их «времени жизни». Условия острой рыночной конкуренции диктуют необходимость сокращения сроков проектирования и производственного освоения новых изделий. Значительная доля общей стоимости изделий микроэлектроники приходится на затраты, связанные с проектированием, поэтому использование современных методов и программных средств на всех составных этапах проектирования и экспериментальной отработки «технология–прибор–схема–система» (ТПСС) становится как никогда актуальным [1, 2].

II. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эффективность использования компьютерных средств проектирования приборной структуры в значительной степени зависит от полноты учета физических явлений в моделях описания отдельных технологических операций обработки полупроводниковых структур и технологического маршрута в целом. Каждый переход к новым технологическим нормам проектирования приводит к появлению новых физических эффектов в МОП-транзисторах, для учета которых необходимо создавать новые модели. Появление новых моделей порождает новые проблемы верификации, достоверности, точности и стандартизации. Одновременно с проблемой достоверности моделей существует проблема быстродействия средств моделирования, которая приводит к необходимости использовать упрощенные модели транзисторов и приближенные методы моделирования электронных цепей. Это неизбежно приводит к потере достоверности моделирования и возрастанию неопределенности в определении области допустимого применения модели. Используемые в настоящее время модели и методы возникли как компромисс между их точностью, достоверностью и вычислительной эффективностью. Трудоемким процессом становится верификация (обоснование достоверности) таких моделей [1].

Стандартные программные средства проектирования и моделирования в микроэлектронике основаны на многообразных моделях транспорта носителей заряда в приборных структурах. Моделирование и проектирование с использованием «встроенных» в указанные модели коэффициентов в других условиях, с другими технологическими нормами могут привести к неадекватным результатам моделирования и проектирования. Задача адаптации физико-математических моделей, используемых в стандартных средствах проектирования изделий микроэлектроники, для нанометровых проектных норм, как и задача разработки соответствующих методов моделирования, реализованных в программных средствах, является важной и актуальной.

Значения входных и выходных параметров, измеренных по результатам формирования элементов ИМС и используемых для статистического анализа и аппроксимации, зачастую содержат ошибки и погрешности, которые существенно сказываются на адекватности результатов статистических исследований. На практике для предотвращения подобных случаев необходимо проводить дополнительную предварительную – перед аппроксимацией и оптимизацией – обработку результатов [3]. В настоящее время процедура обработки экспериментальных данных достаточно хорошо формализована, и исследователю необходимо только правильно ее использовать. Круг

вопросов, решаемых при обработке результатов эксперимента, не так уж велик: это вопросы подбора эмпирических формул и оценки их параметров, вопросы оценки истинных значений измеряемых величин и точности измерений, вопросы исследования корреляционных зависимостей и некоторые другие. Одной из важнейших задач математической обработки результатов эксперимента является оценка истинного значения измеряемой величины по данным эксперимента с возможно меньшей ошибкой [3].

Для повышения адекватности и снижения затрат на экспериментальную отработку ТПСС целесообразно использовать аппроксимационные методы, обеспечивающие построение зависимостей по данным экспериментальных исследований. Применительно к микроэлектронике это означает: построение аппроксимационных полиномиальных зависимостей для описания результатов экспериментов при минимальном их количестве; использование этих зависимостей для статистического анализа и оптимизации параметров приборно-технологических моделей; адаптацию физико-математических моделей, используемых в стандартных средствах проектирования, для нанометровых проектных норм; разработку соответствующего программного обеспечения, реализующего методы статистической обработки и оптимизации; верификацию параметров моделей, включая экстракцию SPICE-параметров, по экспериментальным данным.

Перспективным направлением практического использования полученных результатов является статистический анализ и оптимизация параметров приборно-технологических моделей в сквозном цикле проектирования полупроводниковых приборов. Это позволит повысить адекватность моделей экспериментальным данным, сократить сроки и затраты на разработку новых изделий, обеспечить высокий уровень выхода годных ИМС и эффективно прогнозировать характеристики схем при выбранных режимах технологии.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные методы статистической обработки и оптимизации параметров моделей являются эффективным средством повышения достоверности компьютерного проектирования в микроэлектронике. Их внедрение в сквозной цикл ТПСС будет способствовать решению актуальных задач современной электроники в условиях ужесточающейся конкуренции и перехода к нанометровым нормам. Дальнейшее развитие работ связано с адаптацией физико-математических моделей для новых технологических норм, совершенствованием методов верификации и расширением программных средств статистического анализа и оптимизации.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Кулешов А. А., Малышев В. С., Нелаев В. В., Стемпицкий В. Р. Статистическое проектирование и оптимизация технологии производства интегральных микросхем // Микроэлектроника. – 2003. – Т. 32, № 31. – С. 47–61.

[2] Cunningham S. P., Spanos C. J. Semiconductor yield improvement: results and best practices // IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing. – 1995. – Vol. 8, No. 2. – P. 103–109.

[3] Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М.: Физматлит, 2006.

STATISTICAL DESIGN AND OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND DEVICE STRUCTURES IN MICROELECTRONICS

Novikov F.P.[1], Lopatko A.I.[2], Stempitsky V.R.[1]

[1]Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Minsk, Republic of Belarus, vstem@bsuir.by

[2]Borovlyany Secondary School No. 2 Minsk, Republic of Belarus

Abstract: This paper examines methods for improving the accuracy of computer-aided design (CAD) for microelectronic products through the preliminary statistical processing of experimental data, as well as the optimization and verification of parameters for device and process models. It is demonstrated that the current landscape of integrated circuit development necessitates the integration and unification of CAD tools across the entire "technology–device–circuit–system" design cycle. Particular attention is given to the calibration of parameters for physical-mathematical models–including SPICE parameters–and the requirement to adapt these models to nanometer-scale design rules. The use of statistical methods and approximation functions is proposed as a means to reduce the costs associated with physical experiments and to enhance the reliability of simulation results.

Keywords: computer-aided design, microelectronics, statistical analysis, optimization, model verification, end-to-end design cycle, SPICE parameters, approximation, Monte Carlo.

УДК 004.658.2:025.4.03:004.8

АЛГОРИТМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПОИСКА ИНФОРМАЦИИ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ БАЗАХ ДАННЫХ

Иович Е.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, e.kozhemiako@bsuir.by

Аннотация: в статье рассматриваются современные алгоритмы интеллектуального поиска информации в распределенных базах данных. Основное внимание уделено индексированию, ранжированию, моделям машинного обучения для оценки релевантности, обработке распределённых запросов и методам оценки производительности поиска.

Ключевые слова: распределённые базы данных, индексирование, ранжирование, машинное обучение, релевантность, поисковые системы.

I. ВВЕДЕНИЕ

Современные информационные системы работают с огромными объёмами данных, распределённых между множеством серверов и дата-центров. Эффективный поиск информации в таких условиях требует применения интеллектуальных алгоритмов, которые способны не только быстро находить документы, но и оценивать их релевантность. Проблема поиска в распределённых базах данных стала особенно актуальной с ростом облачных технологий, поисковых платформ и Big Data [1-13].

Методы индексирования. Индексирование является базовым этапом организации поиска. Наиболее распространённым подходом является обратный индекс, в котором каждому термину сопоставляется список документов. В распределённых системах применяются шаржированные индексы, где данные делятся по сегментам. Это позволяет выполнять параллельный поиск и уменьшать задержки. Также используются B-деревья, LSM-деревья и hash-based индексы. LSM-структуры особенно эффективны в системах с высокой интенсивностью записи. (рисунок 1).

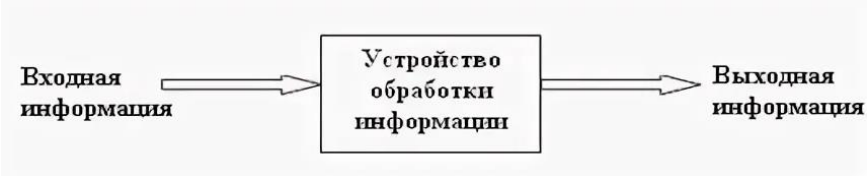


Рисунок 1. Общая схема процесса интеллектуального поиска информации

Представленная схема отражает базовую логику поискового процесса в распределённых системах: на этапе форматирования запрос преобразуется в структурированную форму, далее выполняется поиск по индексам, после чего результаты анализируются и при необходимости производится коррекция запроса. Такой итеративный подход позволяет повышать точность и полноту выдачи.

II. АЛГОРИТМЫ РАНЖИРОВАНИЯ

После нахождения документов система должна определить порядок их выдачи. В современных системах применяются графовые методы ранжирования, такие как PageRank, а также поведенческие факторы: CTR, dwell time и история запросов. После нахождения документов система должна определить порядок их выдачи. Классическими методами являются TF-IDF и BM25. TF-IDF оценивает важность термина внутри документа, а BM25 учитывает длину документа и частоту термов.

ML-модели релевантности. Машинное обучение существенно улучшило качество поиска. Подход Learning to Rank позволяет обучать модели на размеченных данных. Среди популярных алгоритмов используются RankNet, LambdaMART и XGBoost. Нейросетевые архитектуры BERT и Transformer позволяют учитывать семантический контекст запроса, а не только совпадения ключевых слов. Это особенно важно для обработки естественного языка и длинных запросов. Архитектура подобной системы представлена на рисунке 2.

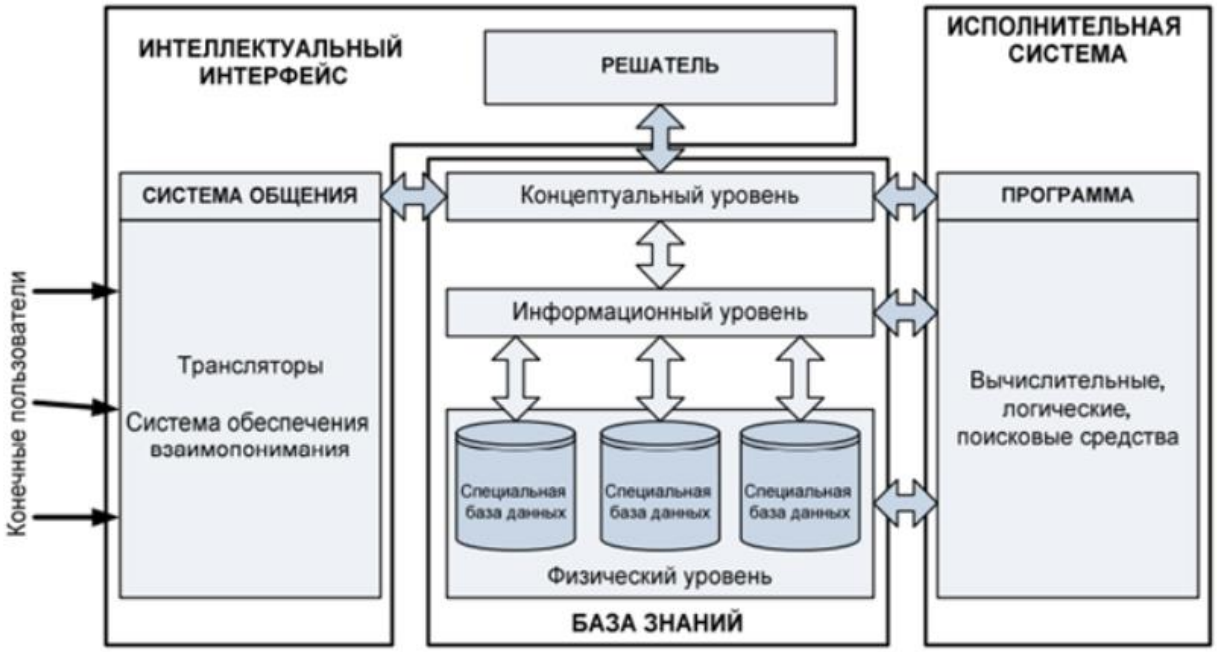


Рисунок 2. Архитектура интеллектуального анализа и выявления аномалий в распределённой системе

Обработка распределённых запросов. В распределённых базах данных запросы выполняются параллельно на нескольких узлах. Существует два основных подхода: scatter-gather и federated search. Scatter-gather предполагает отправку запроса всем узлам и последующую агрегацию результатов. Federated search объединяет результаты из разных независимых источников. Важной задачей является оптимизация сетевых задержек, балансировка нагрузки и минимизация времени агрегации.

Оценка скорости поиска. Производительность поисковых систем оценивается по метрикам latency, throughput и recall. Latency показывает среднее время ответа, throughput – число запросов в секунду. Для измерения качества поиска применяются Precision@K, Recall@K, MAP и NDCG. Оптимизация скорости достигается через кэширование, репликацию и асинхронную обработку запросов.

Перспективы развития. Будущее интеллектуального поиска связано с гибридными системами, объединяющими символический поиск и нейросетевые модели. Развитие векторных баз данных и approximate nearest neighbor (ANN) позволяет эффективно искать семантически похожие объекты. Интеграция LLM открывает возможности для диалогового поиска и генерации ответов на основе распределённых хранилищ данных.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интеллектуальные алгоритмы поиска информации в распределённых базах данных являются основой современных поисковых платформ. Комбинация индексирования, алгоритмов ранжирования, машинного обучения и оптимизации распределённых запросов позволяет достигать высокой скорости и точности поиска. Дальнейшее развитие технологий будет связано с более глубоким использованием нейросетей и семантического анализа данных.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена на базе учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». Автор выражает глубокую признательность руководству и коллективу центра за предоставленную инфраструктуру и техническую поддержку при проведении исследований.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Современные адаптивные системы в умном доме // Международный научно-исследовательский журнал. – 2024. – № 1(139). – DOI: 10.23670/IRJ.2024.139.162.

[2] Zhao, C. The Evolutionary Revolution of Smart Home Systems / C. Zhao // ACM Digital Library. – 2025. – DOI: 10.1145/3745238.3745421.

[3] Интеграция ИИ с системами умного дома / Elec.ru. – 2025. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.elec.ru/publications/it-ii/9345/.

[4] Энергоэффективность и экономия с AI: как нейросети помогают вашему дому тратить меньше / CDT5. – 2025. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cdt5.ru.

[5] Архитектура системы «управления умным домом» / Science-engineering. – 2022. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://s.science-engineering.ru/pdf/2022/2/1388.pdf.

[6] Integration of AI and IoT for Smart Home Automation // International Journal of Scientific Research in Electrical and Computer Engineering. – 2024. – Vol. 11(5).

[7] Протоколы умного дома: от Zigbee до Matter и Thread / Neuracube. – 2025. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://neuracube.ru/blogs/blog/Zigbee-Matter-Thread.

[8] Протокол Matter для умного дома: как работает и что даёт / Lifehacker. – 2024. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://lifehacker.ru/protokol-matter/.

[9] Автоматизация умного дома с нейросетями / Future Media. – 2025. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://media.future-hub.io/stati/avtomatizatsiya-umnogo-doma-s-neyrosetyami.

[10] Зибко, И.В. Разработка системы управления «умным домом» / И.В. Зибко // БГУИР. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/42601/1/.

[11] RL-HEMS: Reinforcement Learning Based Home Energy Management System for HVAC Energy Optimization / ORNL // ASHRAE Transactions. – 2020. – Vol. 126. – PP. 421–429.

[12] Yu, L. Deep Reinforcement Learning for Smart Home Energy Management / L. Yu et al. // IEEE Internet of Things Journal. – 2019. – DOI: 10.1109/JIOT.2019.2957289.

[13] Дубровина, А.С. Анализ безопасности применения нейронных сетей в умном доме / А.С. Дубровина // МИД. – 2024. – С. 14–18.

ALGORITHMS OF INTELLIGENT INFORMATION RETRIEVAL IN DISTRIBUTED DATABASES

E.A. Iovich

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
e.kozhemiako@bsuir.by

Abstract: the article discusses modern algorithms for intelligent information retrieval in distributed databases. The main attention is paid to indexing, ranking, machine learning models for relevance assessment, distributed query processing, and search performance evaluation methods.

Keywords: distributed databases, indexing, ranking, machine learning, relevance, search engines.

Научное издание

КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

(EDA Conference 2026)

Сборник научных трудов
Международной научно-практической конференции

(Республика Беларусь, г. Минск, 23 октября 2026 года)

В авторской редакции
Ответственный за выпуск *В. Р. Стемпицкий*
Компьютерная верстка *Д. Ч. Гвоздовский*

Подписано в печать 20.11.2026. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Arial».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 37,48. Уч.-изд. л. 39,9. Тираж 60 экз. Заказ 209.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.
Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск