
ДОКЛАДЫ БГУИР

Выходит два раза в квартал

Научный журнал издается с января 2003 года

Главный редактор В.А. Богущ

Редакционная коллегия:

Л.М. Лыньков (зам. главного редактора),
А.Н. Осипов (зам. главного редактора),
Т.В. Борботько (ответственный секретарь),
М.П. Батура, В.Е. Борисенко, А.Л. Гурский, С.Е. Карпович, В.К. Конопелько,
А.П. Кузнецов, А.А. Кураев, В.А. Лабунов, В.В. Муравьев, М.М. Татур

Редакционный совет:

И.И. Абрамов, В.Е. Агабеков, И.С. Азаров, В.В. Баранов, А.И. Белоус, И.В. Боднарь,
С.В. Бордусов, С.В. Гапоненко, Н.В. Гапоненко, В.В. Голенков, В.Ф. Голиков, Л.И. Гурский,
А.П. Достанко, В.А. Емельянов, А.А. Иванюк, В.М. Колешко, Ф.Ф. Комаров, Ф.П. Коршунов,
С.П. Кундас, В.А. Куренев, В.И. Курмашев, Н.И. Листопад, С.В. Лукьянец, В.Е. Матюшков,
Л.И. Минченко, Ф.И. Пантелеенко, А.А. Петровский, В.А. Пилипенко, С.Л. Прищеп, А.М. Русецкий,
Н.К. Толочко, А.А. Хмыль, В.Ю. Цветков, В.В. Цегельник, Г.П. Яблонский, В.Н. Ярмолик

Адрес редакции: ул. П. Бровки, 6, к. 326, г. Минск, 220013, Беларусь

Телефон редакции: +375-17-293-88-41

Web-сайт: www.doklady.bsuir.by

E-mail: doklady@bsuir.by

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА

Борисенко В.Е., Лыньков Л.М. Академик В.А. Лабунов – с Юбилеем!	5
Кураев А.А., Матвеев В.В. Моделирование и оптимизация нелинейных электромагнитных процессов. Несинхронное взаимодействие свободных электронов с электромагнитным полем излучения	17
Прищеп С.Л. Квазиодномерные сверхпроводники на пористых кремниевых подложках	28
Мордачев В.И. Оценка уровня электромагнитного фона, создаваемого беспроводными системами информационного обслуживания населения, на основе прогноза территориальной плотности трафика	39
Иванюк А.А., Заливако С.С. Физическая криптография и защита цифровых устройств	50
Карпович С.Е., Дайняк И.В., Кузнецов В.В. Мехатронные системы параллельной кинематики на гибридных приводах прямого действия	59

Борисенко В.Е., Кривошеева А.В., Мигас Д.Б., Пушкарчук В.А., Филонов А.Б., Шапошников В.Л. Атомарная структура, фундаментальные электронные, оптические и магнитные свойства низкоразмерных структур из полупроводников	73
Лыньков Л.М., Богуш В.А., Борботько Т.В, Насонова Н.В., Белоусова Е.С., Бойправ О.В. Новые технологии создания экранов электромагнитного излучения на основе модифицированных порошковых, наноструктурированных и пленочных материалов	85
Вашкевич М.И., Азаров И.С., Петровский А.А. Цифровые банки фильтров для современных задач обработки звуковых сигналов	100

Корректор Л.В. КОНДАКОВА

Компьютерный дизайн и верстка О.В. БОЙПРАВ

Подписано в печать 06.03.2019. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.

Усл. печ. л. 13,25. Уч.-изд. л. 11,3. Тираж 130 экз. Заказ 46.

Индекс для индивидуальной подписки 00787.

Индекс для ведомственной подписки 007872.

Издатель: учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1087 от 23.01.2010.

Отпечатано в БГУИР. ЛП № 02330/264 от 14.04.2014. 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6.

DOKLADY BGUIR

Published twice quarterly

The journal has been published since January, 2003

Editor-in-chief V. A. Bogush

Editorial board:

L.M. Lynkov (deputy editor-in-chief),
A.N. Osipov (deputy editor-in-chief),
T.V. Borbot'ko (executive secretary),
M.P. Batura, V.E. Borisenko, A.L. Gursky, S.E. Karpovich,
V.K. Konopelko, A.P. Kuznetsov, A.A. Kuraev, V.A. Labunov,
L.M. Lynkov, V.V. Muravyov, A.N. Osipov, M.M. Tatur

Editorial council:

I.I. Abramov, V.E. Agabekov, I.S. Azarov, V.V. Baranov, A.I. Belous, I.V. Bodnar, S.V. Bordusov,
S.V. Gaponenko, N.V. Gaponenko, V.V. Golenkov, V.F. Golikov, L.I. Gursky, A.P. Dostanko,
V.A. Yemelyanov, A.A. Ivanyuk, V.M. Koleshko, F.F. Komarov, F.P. Korshunov, S.P. Kundas,
V.A. Kurenev, V.I. Kurmashev, N.I. Listopad, S.V. Lukyanec, V.E. Matyushkov, L.I. Minchenko,
F.I. Panteleenko, A.A. Petrovsky, V.A. Pilipenko, S.L. Prishchepa, A.M. Rusetsky, N.K. Tolochko,
A.A. Khmyl, V.Yu. Tsvetkov, V.V. Tsegelnik, G.P. Yablonsky, V.N. Yarmolik

Address of editorial office: P. Brovka st., 6, room 326, Minsk, 220013, Republic of Belarus

Phone number of editorial office: +375-17-293-88-41

Web-site: www.doklady.bsuir.by

E-mail: doklady@bsuir.by

CONTENTS

ELECTRONICS, RADIOPHYSICS, RADIOENGINEERING, INFORMATICS

Borisenko V.E., Lynkou L.M. Academic V.A. Labunov – Happy Anniversary!	5
Kurayev A.A., Matveyenka V.V. Modeling and optimizing of nonlinear electromagnetic processes. Non-synchronous interaction of free electrons with the electromagnetic radiation field	17
Prishchepa S.L. Quasi one-dimensional superconductors on porous silicon templates	28
Mordachev V.I. Estimation of intensity of electromagnetic background, created by wireless systems of public information services, on the base of forecast of traffic terrestrial density ...	39

Ivaniuk A.A., Zalivaka S.S. Physical cryptography and security of digital devices	50
Karpovich S.E., Dainiak I.V., Kuzniatsou V.V. Mechatronic system of parallel kinematics on hybrid direct action drivers	59
Borisenko V.E., Krivosheeva A.V., Migas D.B., Pushkarchuk V.A., Filonov A.B., Shaposhnikov V.L. Atomic structure, fundamental electronic, optical and magnetic properties of low-dimensional structures of semiconductors.....	73
Lynkou L.M., Bogush V.A., Borbot'ko T.V., Nasonova N.V., Belousova E.S., Boiprav O.V. New technologies for creation of electromagnetic radiation shields based on modified powder, nanostructured and film materials	85
Vashkevich M.I., Azarov I.S., Petrovsky A.A. Digital filter banks for modern audiosignal processing tasks.....	100

УДК 929

АКАДЕМИК В.А. ЛАБУНОВ – С ЮБИЛЕЕМ!

В.Е. БОРИСЕНКО, Л.М. ЛЫНЬКОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 11 февраля 2019

Аннотация. Представлены биография и сведения об основных достижениях доктора технических наук, профессора, академика Национальной академии наук Беларуси, иностранного члена (академика) Российской академии наук Владимира Архиповича Лабунова.

Ключевые слова: медная металлизация, микро-электро-механическая система, наноэлектроника, физика твердого тела.

Abstract. The biography and information about the main achievements of the doctor of technical sciences, professor, academician of the National Academy of Sciences of Belarus, a foreign member (academician) of the Russian Academy of Sciences Vladimir Labunov are presented.

Keywords: copper metallization, micro-electro-mechanical system, nanoelectronics, solid state physics.

Doklady BGUIR. 2019, Vol. 120, No. 2, pp. 5-16
Academic V.A. Labunov – Happy Anniversary!
V.E. Borisenko, L.M. Lynkou



Лабунов Владимир Архипович – ученый в области микро- и наноэлектроники. Родился 16 марта 1939 г. в г. Орша. Окончил Белорусский политехнический институт (1961 г.). С 1966 года работает в Минском радиотехническом институте (МРТИ) – ныне Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР). С 1975 по 1994 год – заведующий кафедрой микрорелектроники МРТИ. Доктор технических наук (1975 г.), профессор (1977 г.), член-корреспондент Академии наук БССР (ныне НАН Беларуси) (1980 г.), академик НАН Беларуси (1986 г.), академик-секретарь Отделения физики, математики и информатики НАН Беларуси (1987–1989 гг.), член Президиума НАН Беларуси (1987–1992 гг. и 2002–2009 гг.).

В 1967–1968 гг. В. А. Лабунов проходил научную стажировку в университете Брауна (США) в области микроэлектроники. В 1973–1974 гг. находился на научной работе в Институте фундаментальной электроники Парижского университета (Франция), в течение 1976 года – в Копенгагенском университете (Дания). В течение 1987–1989 гг. В. А. Лабунов являлся академиком-секретарем Отделения физики, математики и информатики НАН Беларуси. Под его управлением находилось 14 крупнейших институтов академии, на базе которых он разработал и реализовал первую в Республике Беларусь государственную научно-техническую программу «Информатика».

С 1989 по 1991 год В. А. Лабунов являлся членом Верховного Совета СССР, заместителем председателя Комитета по науке и технологиям Верховного Совета СССР (г. Москва) и продолжал работать по совместительству в БГУИР в качестве заведующего кафедрой микроэлектроники и научным руководителем выполняемых кафедрой научных исследований.

С 1991 по 1994 год В. А. Лабунов снова заведовал кафедрой микроэлектроники БГУИР. С 1994 по 2001 год – чрезвычайный и полномочный посол Республики Беларусь в Бельгии, Нидерландах и Люксембурге, постоянный Представитель Республики Беларусь при Европейских сообществах и в НАТО. В это время (с 1997 по 1999 год) он являлся вице-президентом Научно-технической программы Европейского Союза INTAS.

В период с 1966 по 1994 год областью научных исследований В. А. Лабунова была микроэлектроника. С 2001 года по настоящее время В. А. Лабунов – заведующий лабораторией «Интегрированные микро- и наносистемы» БГУИР. С 2002 по 2009 год являлся членом Президиума НАН Беларуси. В это время основным направлением научной деятельности В. А. Лабунова становится наноэлектроника, которая является продолжением развития микроэлектроники.

В. А. Лабунов начал свою профессионально-научную деятельность в области микроэлектроники с момента зарождения этой отрасли в Советском Союзе. Вся его научная деятельность была направлена на решение практических вопросов развития микроэлектроники, прежде всего на одном из флагманов советской микроэлектроники НПО «Интеграл» (г. Минск). В то же время он взаимодействовал с основными предприятиями микроэлектроники г. Зеленограда: НПО «Микрон», НПО «Ангстрем», НИИТМ, НИИВТ и др.

С 1975 по 1994 год В. А. Лабунов являлся заведующим кафедрой микроэлектроники БГУИР. Кафедра микроэлектроники выпустила тысячи специалистов высокой квалификации, составивших костяк таких флагманов электронной промышленности, как НПО «Интеграл», НПО «Планар» и десятки других радиоэлектронных предприятий Республики Беларусь и России.

В 1975 году на базе кафедры микроэлектроники решением Государственного комитета по науке и технологиям была открыта первая в СССР в области микроэлектроники проблемная лаборатория «Электрохимические и плазменные процессы в микроэлектронике». Эта тематика и стала основным направлением исследований В. А. Лабунова. Проводимые под руководством В. А. Лабунова исследования в своем большинстве являлись пионерскими. Были проведены широкомасштабные исследования в области электрохимических и химических (далее – электро(химических)) процессов, на основе которых разработан ряд технологических процессов, получивших широкое применение в производстве интегральных схем (ИС).

Коллектив В. А. Лабунова одним из первых в мире начал разработку медной металлизации ИС, что предопределило возможность перехода к технологической норме 90 нм и менее при производстве ИС мировыми лидерами в области микроэлектроники.

Все полупроводниковые сверхбольшие ИС в мире производятся в настоящее время с Si металлизацией.

Разработаны технологические процессы формирования ряда пористых материалов: кремния (Si-пор) и оксидов вентильных металлов электрохимическим анодированием. Результаты этих исследований были внедрены в производство в качестве различных компонентов ИС. В настоящее время эти материалы относятся к категории наноструктурированных и получили «вторую жизнь» в наноэлектронике. Следует отметить созданную интегральную оптоэлектронную ячейку в кремнии на основе Si-пор светоизлучающего диода. Данная разработка открывает путь к долгожданной кремниевой оптоэлектронике.

Мировую известность получила разработанная уникальная электрохимическая технология производства печатных плат, микромодулей, интерпозеров и корпусов ИС, которая получила название ЭЛАТ, защищена патентами США и нашла применение на многих предприятиях СССР, в США, Китае, Индии. В области плазменных и ионно-лучевых процессов в микроэлектронике на основе разработок проблемной лаборатории В. А. Лабуновым была выдвинута и реализована идея создания высокоэффективной, полностью автоматизированной с замкнутым циклом технологии производства ИС. Технология основана на использовании только низкотемпературной плазмы, ионных и электронных пучков и оптического излучения, так называемых «сухих процессов». Впервые в мировой практике на 15 лет раньше, чем на Западе были запатентованы и продемонстрированы интегрированные системы производства ИС в одной вакуумной камере, реализующие эту технологию. В настоящее время мировая микроэлектроника работает на подобном оборудовании, которое называют «кластерным». В. А. Лабунов осуществлял научное руководство проектом «Основа» по разработке интегрированных систем линейного типа производства ИС, практическую реализацию которых выполняли более 10 предприятий электронной промышленности Советского Союза.

Используя свои научные знания и организационные достижения в области микроэлектроники, В. А. Лабунов с помощью сотрудников кафедры микроэлектроники, которая была реорганизована в кафедру микро- и наноэлектроники (МНЭ), принимал участие в создании ряда лабораторий, определив им новую тематику исследований в различных областях, относящихся к наноэлектронике. В. А. Лабунов возглавляет в БГУИР научное направление «Микро- и наноэлектроника», включающее 13 подразделений, в том числе: «Центр взаимодействия с научно-техническими программами Европейского Союза», «Центр наноэлектроники и новых материалов», «Центр многокристалльных микроэлектронных модулей», «Физика приборов микро- и наноэлектроники», «Технология гибридных микросхем», «Материалы и структуры наноэлектроники», «Компьютерное проектирование микро- и наноэлектронных систем», «Нанофотоника», «Интегрированные микро- и наносистемы», «Устройства обработки и отображения информации», «Моделирование процессов радиационной модификации твердых тел», «Нанотехнологии», «Электрохимически наноструктурированные материалы».

В рамках ряда лабораторий В. А. Лабунов осуществляет научное руководство конкретными проектами. Исследования в области наноэлектроники, проводимые непосредственно под руководством В. А. Лабунова, посвящены разработке наноэлектронных компонентов для нового поколения информационных и коммуникационных систем. Это транзисторы, магнитные устройства хранения и обработки информации, поглотители электромагнитного излучения в широком диапазоне частот, солнечные элементы,

суперконденсаторы и микротопливные элементы, устройства на основе полевой эмиссии, микроэлектромеханические системы (МЭМС). Эти компоненты создаются за счет специально разработанных наноструктурированных неорганических и функциональных органических материалов на основе углерода, пористых кремния и окислов вентильных металлов в виде наночастиц, нанотрубок, нанопроводов и получаемых самосборкой нанослоев.

Начиная с 2003 года, В. А. Лабунов – научный руководитель государственных комплексных программ научных исследований (ГКПНИ) «Электроника», «Наноматериалы и нанотехнологии» и государственных программ научных исследований (ГПНИ) «Электроника и фотоника», «Функциональные и машиностроительные материалы, наноматериалы», «Конвергенция». Согласно постановлению Совета министров Республики Беларусь он является заместителем руководителя государственной комплексной целевой научно-технической программы «Электроника и оптика», в которую входят ГНТП «Микроэлектроника», «Радиоэлектроника», «Оптех» и ГПНИ «Электроника» и «Фотоника».

Проекты этих программ, относящиеся к наноэлектронике, курируются непосредственно В. А. Лабуновым, который организовал в Беларуси мощную кооперацию между учеными вузов, институтов НАН Беларуси и промышленных предприятий для выполнения заданий государственных программ. Исследования под руководством В. А. Лабунова проводятся в широкой кооперации с ведущими научными организациями мира и с вузами, институтами Академии наук и отраслевыми научными организациями России.

В. А. Лабунов является автором более 400 научных работ и 500 авторских свидетельств на изобретение в области микро- и наноэлектроники. Под его руководством защищено 78 кандидатских и 12 докторских диссертаций. Коллектив кафедры микроэлектроники и проблемной лаборатории, которыми руководил В. А. Лабунов, имел огромный международный опыт. Из примерно 250 сотрудников более 100 прошли научную стажировку в научных учреждениях западных стран сроком не менее одного года. Они все прекрасно владеют иностранными языками, что облегчает им взаимодействие с мировым научным сообществом.

В 1978 году за высокие достижения в области науки и техники В. А. Лабунову присвоено звание «Заслуженный изобретатель Белорусской ССР», а в 1992 году – звание лауреата Государственной премии Республики Беларусь за цикл работ «Создание и промышленная реализация высокоэффективной системной технологии массового производства сверхбольших интегральных схем». В. А. Лабунов награжден орденами Октябрьской Революции (1986 г.), Трудового Красного Знамени (1981 г.) и медалью «За трудовую доблесть» (1979 г.). Учитывая результаты совместных с российскими учеными работ, академик В. А. Лабунов в 2012 году избран почетным членом Нанотехнологического общества России. Другими Почетными членами общества являются только лауреат Нобелевской премии Ж. И. Алферов, Президент Национальной академии наук Украины Б. Е. Патон, вице-президент Российской академии наук М. В. Ковальчук. В 2016 году В. А. Лабунов избран иностранным членом Российской академии наук. Профессионально владеет английским и французским языками.

Ниже представлены снимки из фотоархива В. А. Лабунова, демонстрирующие широту его профессиональной деятельности.

УЧЕНЫЙ



Аспирант



В лаборатории вакуумной техники МРТИ



Защита докторской диссертации



Демонстрация «Бочки Лабунова» лауреату Нобелевской премии Н. Басову и заместителю председателя Совета Министров СССР Г. Марчуку



ДИПЛОМАТ



Чрезвычайный и полномочный посол Республики Беларусь (Брюссель)



На дипломатическом приеме



Вручение верительной грамоты
королю Бельгии



Вручение верительной грамоты королеве Нидерландов



Вручение верительной грамоты Великому герцогу Люксембургскому



С Председателем Европейской комиссии Жаком Делором



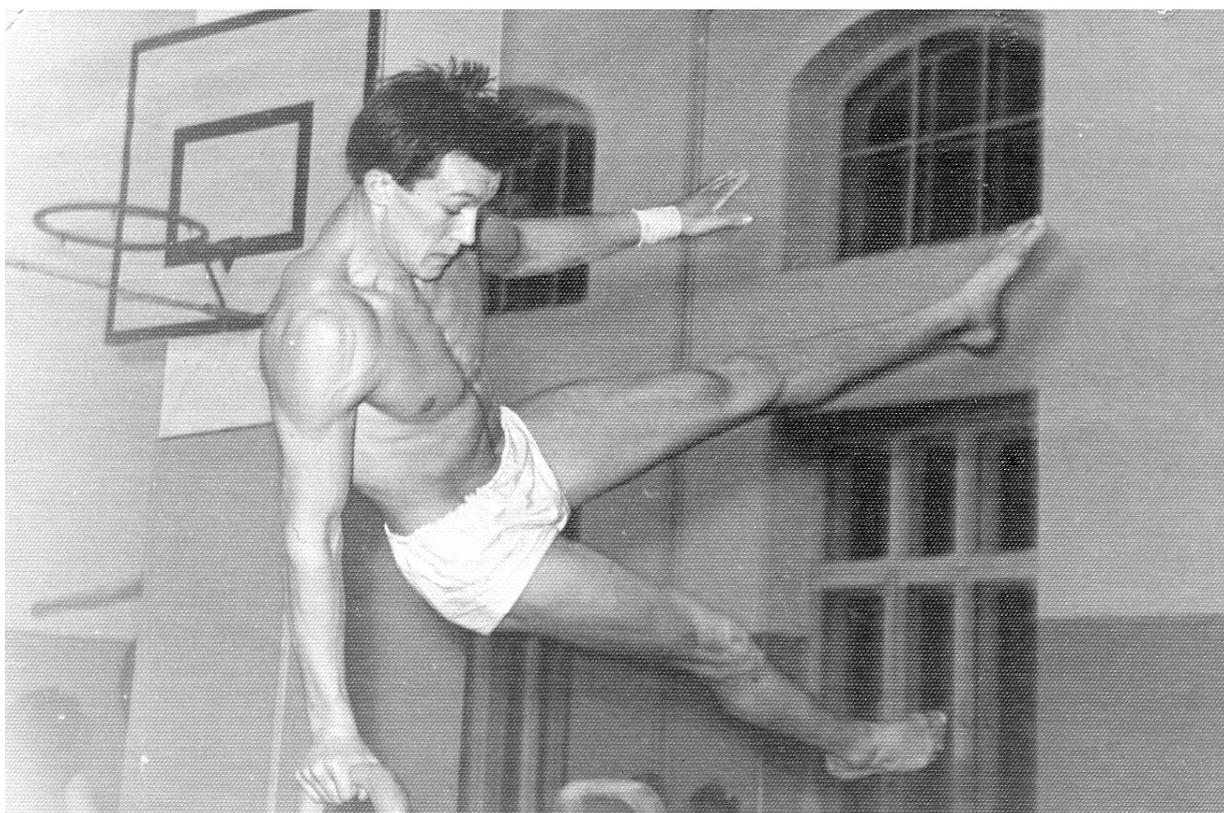
С Генеральным секретарем НАТО Хавьером Солано

ЧЛЕН ВЕРХОВНОГО СОВЕТА СССР



На заседании в Кремле

СПОРТСМЕН



Мастер спорта СССР по спортивной гимнастике



Член сборной команды Советского Союза по прыжкам с шестом



Факелосоец на Олимпиаде-80



По-прежнему спортсмен



И отдыхать тоже успеваает

УДК 621.385.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ. НЕСИНХРОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ

А.А. КУРАЕВ, В.В. МАТВЕЕНКО

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 21 января 2019

Аннотация. Представлены основные результаты исследований, выполненных в рамках научного направления «Моделирование и оптимизация нелинейных электромагнитных процессов» в 2013–2018 годах. На основе численного моделирования установлен эффект систематического (независимого от частоты и фазы поля) торможения и отражения ансамбля свободных электронов, изначально движущихся в направлении элементарного электрического излучателя. Показано одно из практических приложений найденного эффекта в терагерцовом генераторе с несинхронным взаимодействием – сферотроне. Указана роль установленного эффекта в процессах несинхронного взаимодействия свободных электронов с полем электромагнитного излучения в ионосфере и солнечной короне.

Ключевые слова: несинхронное взаимодействие, поле излучения, генератор, усилитель, терагерцовый диапазон.

Abstract. The main results of the researches in the scientific direction «Modeling and optimizing nonlinear electromagnetic processes» for 2013–2018 years are presented. On the basis of numerical simulation, the effect of systematic (independent of the frequency and phase of the field) braking and reflection of an ensemble of free electrons, initially moving in the direction of an elementary electric radiator, is established. One of the practical applications of the found effect in a terahertz generator with asynchronous interaction, the spherotron, is shown. The role of the established effect in the processes of asynchronous interaction of free electrons with the field of electromagnetic radiation in the ionosphere and the solar corona is indicated.

Keywords: non-synchronous interaction, radiation field, generator, amplifier, terahertz range.

Doklady BGUIR. 2019, Vol. 120, No. 2, pp. 17-27

Modeling and optimizing of nonlinear electromagnetic processes.

Non-synchronous interaction of free electrons with the electromagnetic radiation field

A.A. Kurayev, V.V. Matveyenka

Введение

Научные исследования в направлении «Моделирование и оптимизация нелинейных электромагнитных процессов», начало которых относится к 1969 г. [1], привели в 2013–2018 гг. к следующим основным результатам.

1. Разработаны алгоритмы с сильной устойчивостью для решения краевых задач в теории нерегулярных волноводов [2–4] и сформулированы строгие уравнения возбуждения произвольно-нерегулярных волноводов с анизотропным заполнением электронными потоками с трехмерной фазировкой электронов [5–8]. По итогам этих и более ранних работ издана монография [9].

2. Проведена оптимизация по КПД релятивистских черенковских генераторов и усилителей [10, 11]. На основе этих и более ранних работ издана монография [12].

3. Проведена оптимизация гирорезонансных приборов различных конструкций: гиротрона на второй гармонике циклотронной частоты [12], гиро-ЛБВ на замедленной E_{0r} -волне гофрированного волновода [14, 15], коротковолновых гиротронов с зеркальными резонаторами [16]. Представлены перспективные модификации гирорезонансных приборов, включая гироклиноклистроны, на конических коаксиальных резонаторах, клиногиротроны, импульсные гиро-ЛБВ, гиро-ЛОВ в режиме сверхизлучения, широкополосный гироусилитель на коническом волноводе [17]. Метод селекции мод E_{1in} и H_{0in} в резонаторах гиротронов представлен в [18]. Влияние факторов, снижающих эффективность пениотронов, представлено в [19]. На основе этих и более ранних работ издана монография [20].

4. Продолжены исследование и оптимизация конструкций приборов терагерцового частотного диапазона: односекционных и многосекционных ЛОВ и ЛБВ на волнообразно плоско свернутых волноводах [21–25], орбитронов с трансформирующей канавкой у сдвоенной гребенки [26–29], клинооротрона с азимутальной гребенкой [30]. По итогам этих и более ранних работ опубликована монография [31].

5. Предложены и исследованы электронные приборы СВЧ нового типа: гиротон на гофрированном резонаторе [32], релятивистский гелитрон [33], безмагнитный клистрон удвоитель [34], ЛСЭ с электростатическим модулятором [35], двулучевая ЛОВ–ЛБВ на спирально изогнутом прямоугольном волноводе [36], на ее конструкцию получен патент Республики Беларусь [37].

В процессе проведенных исследований получены знания о новых физических явлениях при нелинейном взаимодействии электронных потоков с электромагнитными полями. Они описаны в перечисленных публикациях.

Наиболее важное физическое явление для освоения терагерцового диапазона частот – появление систематической части при несинхронном взаимодействии электронов с полем излучения – торможение и отражение электронов электромагнитным полем – является содержательной частью данной статьи.

Несинхронное взаимодействие свободных электронов или других заряженных частиц с электромагнитным полем – сравнительно малоисследованная область в физике и электронике СВЧ. Первой работой, в которой обращено внимание на то, что в неоднородном продольном по отношению к начальной скорости электрона быстро осциллирующем электрическом поле электрон приобретает приращение систематической составляющей скорости, является статья Миллера [38]. Несинхронное взаимодействие электронов с продольным неоднородным высокочастотным полем подробно исследовано в работах [39–41], в том числе и в приложении к созданию генераторов с несинхронным взаимодействием. Однако остается неисследованным более общий вопрос о несинхронном взаимодействии свободных электронов с полем излучения, структура которого имеет поперечные компоненты, и не только электрические, как в [38–41], но и магнитные. Элементарный излучатель выбран по той причине, что любой сложный излучатель представляет собой дискретный или интегральный ансамбль элементарных электрических и магнитных излучателей.

Исследованию данной проблемы и посвящена вторая часть настоящей статьи.

Математическая модель взаимодействия электронов с полем элементарного электрического излучателя

Используя формулы компонент поля элементарного электрического излучателя в сферической системе координат r, θ, φ [42] и преобразуя их выражения в прямоугольную систему координат x, y, z , имеем:

$$\vec{E} = E_m \vec{e}, \quad H = \frac{E_m}{W^0} \vec{h}, \quad \text{где} \tag{1}$$

$$e_x = 2 \left(\frac{\sin \Phi}{r^2} - \frac{\cos \Phi}{r^3} \right) \frac{z \cdot x}{r^2} + \left(\frac{\cos \Phi}{r} + \frac{\sin \Phi}{r^2} - \frac{\cos \Phi}{r^3} \right) \frac{z \cdot x}{r^2};$$

$$e_y = 2 \left(\frac{\sin \Phi}{r^2} - \frac{\cos \Phi}{r^3} \right) \frac{z \cdot y}{r^2} + \left(\frac{\cos \Phi}{r} + \frac{\sin \Phi}{r^2} - \frac{\cos \Phi}{r^3} \right) \frac{z \cdot y}{r^2};$$

$$e_z = 2 \left(\frac{\sin \Phi}{r^2} - \frac{\cos \Phi}{r^3} \right) \frac{z^2}{r^2} - \left(\frac{\cos \Phi}{r} + \frac{\sin \Phi}{r^2} - \frac{\cos \Phi}{r^3} \right) \frac{\rho^2}{r^2};$$

$$h_x = - \left(\frac{\cos \Phi}{r} + \frac{\sin \Phi}{r^2} \right) \frac{y}{r}; \quad h_y = \left(\frac{\cos \Phi}{r} + \frac{\sin \Phi}{r^2} \right) \frac{x}{r}.$$

Здесь приняты следующие безразмерные переменные: $r = kr'$, $x = kx'$, $y = ky'$, $z = kz'$, $\Phi = T - r$, $T = \omega t$, $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$, $k = \frac{\omega}{c} = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$, $W^0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$, $\omega = 2\pi f$, ϵ_0 , μ_0 – диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума, штрихованные переменные – размерные.

Уравнение движения релятивистского электрона в безразмерных переменных имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{d\vec{\beta}}{dT} = -A_m \sqrt{1 - \beta^2} \left(\vec{e} + [\vec{\beta}, \vec{h}] - \vec{\beta}(\vec{\beta}, \vec{e}) \right); \\ \frac{d\vec{r}}{dT} = \vec{\beta}. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь $\vec{\beta} = \vec{v} / c = \vec{v} \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$, $A_m = \frac{E_m e}{m_0 c \omega}$, e , m_0 – соответственно заряд и масса покоя в системе x, y, z электрона.

Начальные условия к системе (2) задаются как $\vec{r}_i(0) = \vec{r}_0$, $\vec{\beta}_i(0) = \vec{\beta}_0$, $\Phi_i(0) = 2\pi i / N$, $i = \overline{1, N}$, i – номер электрона, N – число электронов в ансамбле.

Результаты расчетов

В соответствии с методикой [40] рассчитывались средние по N -ансамблю величины: $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$, $\bar{z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i$, $\bar{\gamma} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \gamma_i$, $\gamma_i = (1 - \beta_i^2)^{-1/2}$, в расчетах $N = 64$.

Вариант 1. Движение электронов по оси z (по направлению оси излучателя): $\vec{\beta}_0 = -\vec{z}_0 \beta_0$, $\vec{r}_0 = \vec{z}_0 z_0$.

На рис. 1 приведены усредненные траектории электронов $\bar{z}(T)$ с различными β_0 и $z_0 = 20$ – это проекция трехмерного движения электронов на ось z .

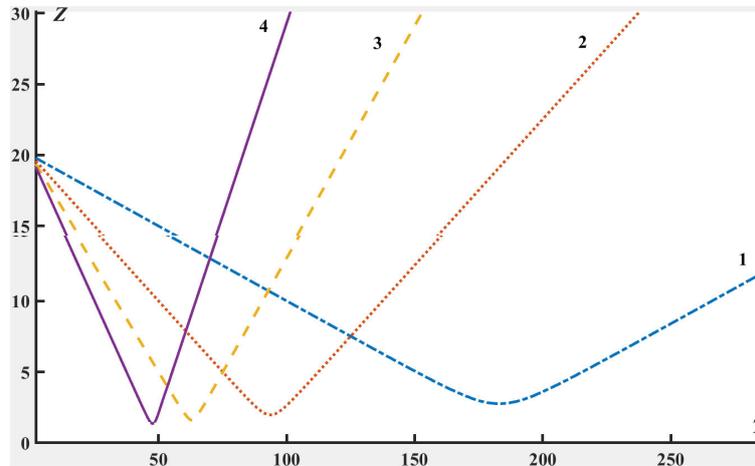


Рис. 1. Зависимости $\bar{z}(T)$ при $z_0 = 20$, $A = 1$: 1 – $\beta_0 = 0,1$; 2 – $\beta_0 = 0,2$; 3 – $\beta_0 = 0,3$; 4 – $\beta_0 = 0,4$

Анализ приведенных на рис. 1 данных указывает на следующее.

1. Все электроны с $\beta_0 = 0,1 \dots 0,4$ отражаются полем излучателя.

2. Отражение происходит при $z < 5$, т. е. фактически в ближней зоне, где напряженность поля резко увеличивается (растет).

3. В области $z > 5$ поле в среднем не влияет на движение электронов, т. е. систематическая составляющая воздействия отсутствует.

На рис. 2 представлены зависимости $\bar{\gamma}(T)$ для тех же значений β_0 .

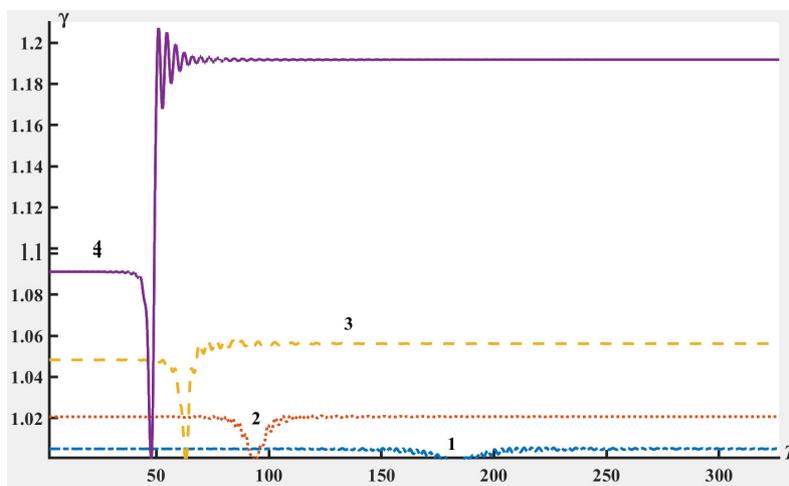


Рис. 2. Зависимости $\bar{\gamma}(T)$ при $z_0 = 20$, $A = 1$: 1 – $\beta_0 = 0,1$; 2 – $\beta_0 = 0,2$; 3 – $\beta_0 = 0,3$; 4 – $\beta_0 = 0,4$

Анализ представленных на рис. 2 зависимостей указывает на следующее.

1. Во всех случаях в моменты T отражения $\bar{\gamma}$ опускаются до 1, поскольку $\beta = 0$ в точках отражения.

2. Энергия отраженных электронов заметно превышает их исходную энергию, особенно при больших β_0 . Так, при $\beta_0 = 0,4$ приращение энергии электрона $-\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\bar{\gamma}_1 - \gamma_0}{\gamma_0 - 1}$ составляет 1,1, 0,09, -10^{-2} , -10^{-3} при различных амплитудах излучения $A = (1, 2, 3, 4)$, $\bar{\gamma}_1$ – конечное значение $\bar{\gamma}$.

Это связано с тем, что при больших β_0 электрон проникает в поле с более высоким градиентом интенсивности, а нелинейные эффекты возрастают с ростом β_0 , а вместе с ними и систематическая часть воздействия.

Вариант 2. Движение электронов по оси x (нормально к оси излучателя, по направлению максимального излучения): $\vec{\beta}_0 = -\vec{x}_0\beta_0$, $\vec{r}_0 = \vec{x}_0x_0$.

На рис. 3 приведены усредненные траектории электронов $\bar{x}(T)$ с различными β_0 и $x_0 = 20$. Это проекция трехмерного движения электронов на ось x .

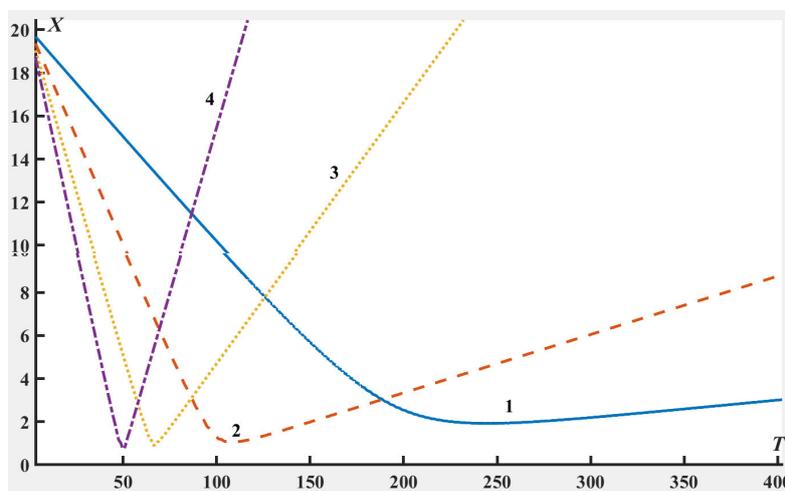


Рис. 3. Зависимости $\bar{x}(T)$ при $x_0 = 20$, $A = 1$: 1 – $\beta_0 = 0,1$; 2 – $\beta_0 = 0,2$; 3 – $\beta_0 = 0,3$; 4 – $\beta_0 = 0,4$

Анализ представленных на рис. 3 траекторий указывает на следующее:

1. При всех $\beta_0 = 0,1 \dots 0,4$ электроны отражаются полем излучения.
2. Отражения происходят при $x < 2$, т.е. в гораздо более сильном поле (и при значительно более высоком градиенте интенсивности поля), чем в варианте 1 (направление x).
3. В области $x > 2$ поле фактически не влияет на движение электронов.

На рис. 4 приведены зависимости $\bar{\gamma}(T)$ для электронов с теми же β_0 . Эти зависимости указывают на следующую особенность движения электронов в направлении, нормальном к оси излучателя: после отражения электроны теряют энергию, т.е. имеет место положительный КПД взаимодействия электронов с полем излучения. Этот КПД рассчитывается как $\eta = \frac{\gamma_0 - \bar{\gamma}_1}{\gamma_0 - 1}$,

где $\bar{\gamma}_1$ конечное значение для отраженного электрона. Например, для $\beta_0 = 0,4$ $\eta = (0,47, 0,98, 0,99, 1)$ при соответствующих амплитудах излучателя $A = (1, 2, 3, 4)$. Таким образом, излучение получает усиление от встречного потока электронов. Этот вывод представляется весьма интересным с общезначимой точки зрения: потоки заряженных частиц существуют и в околоземном пространстве, в ионосфере, в поле солнечного излучения, излучения передатчиков космических аппаратов.

С другой стороны, возможность остановки электрона в ближней зоне излучения может быть использована в специальных конструкциях генераторов с несинхронным взаимодействием. Далее приведен пример такой конструкции генератора – сферотрон.

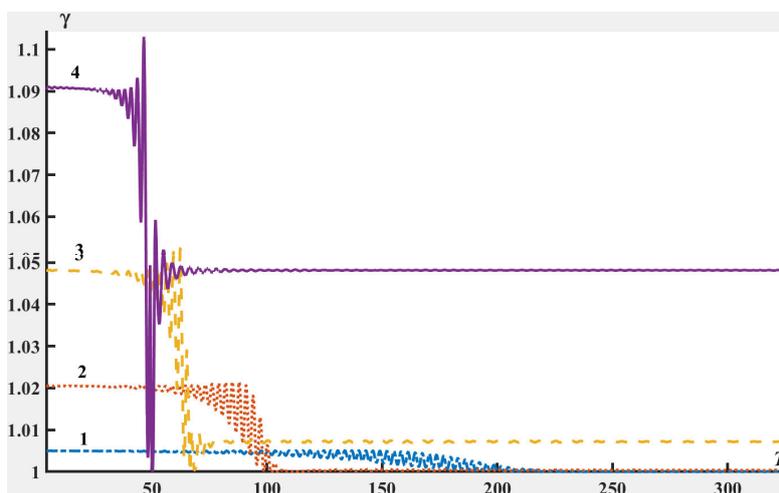


Рис. 4. Зависимости $\bar{\gamma}(T)$ при $x_0 = 20$, $A = 1$: 1 – $\beta_0 = 0,1$; 2 – $\beta_0 = 0,2$; 3 – $\beta_0 = 0,3$; 4 – $\beta_0 = 0,4$

Сферотрон

Схема сферотрона и распределение силовых линий электрического поля резонатора на колебании E_{310} представлены на рис. 5. Здесь 1 – катод, 2 – кольцевой первый анод с напряжением u_1 , 3 – двусферический резонатор, находящийся под потенциалом u_0 относительно катода, 4 – очертания электронного потока; 5 – камера системы охлаждения коллектора; 6 – вакуумно-плотные изоляционные керамические шайбы. Ось z совмещена с осью пучка. Меридианный угол ϑ сферической системы координат отсчитывается от оси z (для пучка $\vartheta = 0$). Размеры резонатора определяются радиусами полусфер: a – большой, b – малый. Вывод энергии на рис. 5 не указан. Он может быть реализован в виде прямоугольного волновода, связанного с резонатором через азимутальную щель или окно в стенке внешней сферы у торца резонатора. При большой мощности сферотрона по азимуту резонатора могут быть сделаны несколько таких выводов энергии. Вместо волновода может быть использован выходной рупор, облучающий внешнюю фокусирующую электромагнитный луч антенну.

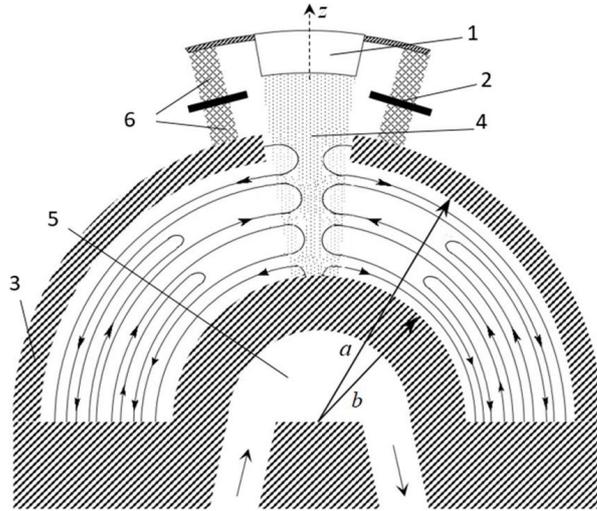


Рис. 5. Принципиальная схема сферотрона (вариант 1)

Поле колебания E_{n10} двусферического резонатора можно рассматривать как суперпозицию расходящихся (запаздывание $-r$) и сходящихся (обратное запаздывание r) волн фиктивного элементарного электрического источника, находящегося в центре сфер резонатора. Используя теорию сферических волн элементарного электрического излучателя [43], получаем следующие формулы компонент поля колебания E_{n10} как результат интерференций расходящихся и сходящихся сферических волн:

$$\begin{aligned}
 E_r &= E_m \cos \omega t \left(\frac{\cos r}{(r)^2} - \frac{\sin r}{(r)^3} \right) \cos \vartheta; \\
 E_\vartheta &= \frac{E_m}{2} \cos \omega t \left(\frac{\sin r}{r} + \frac{\cos r}{(r)^2} - \frac{\sin r}{(r)^3} \right) \sin \vartheta; \\
 H_\varphi &= -\frac{E_m}{2W^0} \sin \omega t \left(\frac{\cos r}{r} - \frac{\sin r}{(r)^2} \right) \sin \vartheta,
 \end{aligned} \tag{3}$$

где $W^0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$ – волновое сопротивление вакуума.

Резонансные значения радиусов сфер резонатора a и b находятся из условий $E_\vartheta(a) = 0$; $E_\vartheta(b) = 0$. Или, используя (3):

$$\begin{aligned}
 \sin a + \frac{\cos a}{a} - \frac{\sin a}{(a)^2} &= 0; \\
 \sin b + \frac{\cos b}{b} - \frac{\sin b}{(b)^2} &= 0.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Граничные условия на торцевой стенке резонатора, как следует из формулы (3), при $\vartheta = \pi/2$ автоматически выполняются: $E_r = 0$, H_φ параллельна поверхности торца.

Результаты расчета сферотрона

Приведем результаты расчета сферотрона на колебании E_{110} резонатора: $a = 6,1168$, $b = 2,7437$. Зона генерации этого варианта изображена на рис. 6. Здесь КПД достигает значения $\eta_e = 0,35$ при $\beta_0 \sim 0,402$, $A \sim 3,5$. Зона весьма широка.

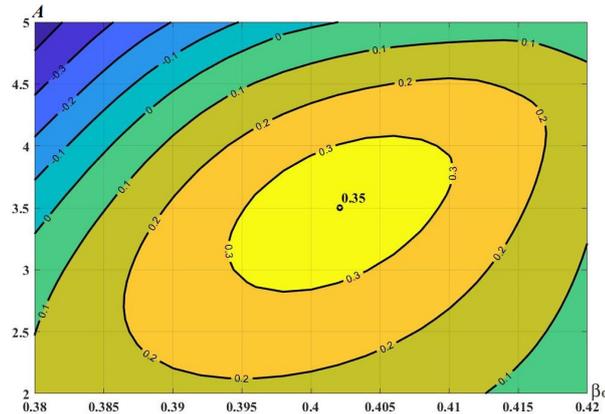


Рис. 6. Зоны генерации с различными КПД в координатах β_0, A

Исследование режима возбуждения генератора показало, что при любых токах электронного потока режим возбуждения остается мягким, т. е. рабочий ток всегда больше пускового. Генератор допускает увеличение рабочего тока до 20 кА при снижении КПД до 30 %.

Может быть и другая конструкция сферотрона (вариант 2). Она представлена на рис. 7. Здесь предусмотрена многопучковая конструкция: пучки 1 расположены по полудуге экваториального сечения резонатора ($\theta = \pi/2$). Полу плоскость 2 служит как для крепления внутренней сферы резонатора, так и для селекции мод E_{n10} резонатора. Таким образом, этот вариант сферотрона, являясь многопучковым, может обеспечить повышенную мощность генерации. Предварительные исследования показали, что его КПД больше, чем в варианте 1 сферотрона, причем при больших значениях радиального индекса n рабочей моды. Так, на моде E_{710} двусферического резонатора сферотрона – полу плоскость 2 достигает 53 % при $A = 1,08, \beta = 0,225$.

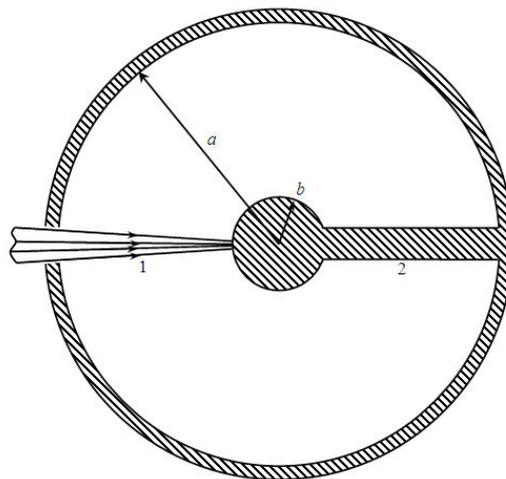


Рис. 7. Схема азимутального сферотрона: 1 – радиальный электронный поток (x-направление); 2 – полу плоскость крепления внутренней сферы и селекции E_{n10} колебания резонатора

Заключение

Установленные закономерности несинхронного взаимодействия свободных электронов с электромагнитным излучением могут быть важны как при создании генераторов и усилителей терагерцового диапазона с несинхронным взаимодействием, так и при исследовании взаимодействия передающих антенн спутников с ионосферой. Заметим, что отражение заряженных частиц в мощном поле электромагнитного излучения может служить эффективной защитой от пучкового оружия в космосе.

Тот феномен, что при отражении потока электронов в нормальном направлении от источника независимо от частоты электроны теряют значительную часть энергии, позволяет создавать широкополосные усилители с уникальными свойствами.

Список литературы

1. Кураев А.А., Попкова Т.Л., Сеницын А.К. Мощные приборы сверхчастотных частот. Нелинейная теория и численная оптимизация // Докл. БГУИР. 2014. № 2 (80). С. 73–86.
2. Кураев А.А., Матвеев В.В., Попкова Т.Л. Устойчивые численные методы решения плохо обусловленных задач электродинамики и нелинейной динамики // Докл. БГУИР. 2014. № 3 (97). С. 5–11.
3. Kurayev A.A., Matveyenko V.V., Popkova T.L. Algorithms with stabilizing coefficients for solving poorly determined radiophysics problems // J. of Radiophysics and Electronics. 2016. Vol. 7 (21), № 3, P. 5–10.
4. Кураев А.А., Матвеев В.В., Попкова Т.Л. Алгоритм с сильной устойчивостью для решения краевых задач в теории нерегулярных волноводов // Докл. БГУИР. 2018. № 8 (118). С. 12–17.
5. Кураев А.А., Рак А.О., Сенько А.В. Возбуждение волноводов и резонаторов электронными потоками // Докл. БГУИР. 2015. № 3 (89). С. 5–10.
6. Кураев А.А., Ерёмка В.Д., Рак А.О. Возбуждение волноводов и резонаторов электронными потоками // Радиофизика и электроника. 2015. Т. 6, № 2. С. 68–72.
7. Кураев А.А., Матвеев В.В., Попкова Т.Л. Уравнения возбуждения волновода с продольно-нерегулярным заполнением магнитодиэлектриком // Докл. БГУИР. 2018. № 4 (114). С. 100–104.
8. Кураев А.А., Рак А.О., Попкова Т.Л. Возбуждение произвольно-нерегулярного волновода с неоднородным заполнением анизотропным диэлектриком // Докл. БГУИР. 2015. № 6 (92). С. 5–9.
9. Кураев А.А., Матвеев В.В., Попкова Т.Л. Нерегулярные электродинамические системы. Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018. 140 с.
10. Оптимальные по КПД релятивистские генераторы и усилители. Часть 1 / В.Ф. Кравченко [и др.] // Физические основы приборостроения. 2012. Т. 1, № 2. С. 41–64.
11. Оптимальные по КПД релятивистские генераторы и усилители. Часть 2 / В.Ф. Кравченко [и др.] // Физические основы приборостроения. 2013. Т. 2, № 1. С. 78–99.
12. Кураев А.А., Рак А.О., Гуринович А.Б. Черенковские усилители и генераторы на нерегулярных волноводах. Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. 118 с.
13. Колосов С.В., Кураев А.А. Миллиметровый гиротрон на второй гармонике циклотронной частоты // Матер. Междунар. науч.-техн. конф., приуроченной к 50-летию МРТИ–БГУИР. В 2 ч. Ч. 1. Минск, 2014. С. 34–35.
14. Кураев А.А., Матвеев В.В., Сеницын А.К. Моделирование гиро-ЛБВ на замедленной E_{01} -моды // Матер. междунар. науч. конф. «Информационные технологии и системы». Минск, 2013. С. 218–219.
15. Генератор на циклотронном резонансе: пат. 19572 Респ. Беларусь / А.А. Кураев, В.В. Матвеев, А.К. Сеницын; дата публ. 30.10.2015.
16. Гиротроны и гиро-ЛБВ на замедленной E_{01} -моды гофрированного волновода / В.Ф. Кравченко [и др.] // Физические основы приборостроения. 2015. Т. 4, № 4 (17). С. 40–55.
17. Кравченко В.Ф., Кураев А.А., Матвеев В.В. Коротковолновые гиротроны с зеркальными резонаторами // Физические основы приборостроения. 2017. Т. 6, № 3 (25). С. 28–37.
18. Кураев А.А., Матвеев В.В. Перспективные модификации гирорезонансных приборов // Докл. БГУИР. 2017. № 8 (110). С. 26–32.
19. Кураев А.А., Матвеев В.В. Селекция мод H_{0in} и E_{1in} в цилиндрическом резонаторе с круговым сечением // Докл. БГУИР. 2017. № 5 (107). С. 85–89.
20. Кураев А.А., Матвеев В.В., Сеницын А.К. Исследование влияния некоторых факторов на эффективность пениотрона // Матер. Междунар. науч.-техн. конф., приуроченной к 50-летию МРТИ–БГУИР. В 2 ч. Ч. 1. Минск, 2014. С. 42–43.
21. Кураев А.А., Матвеев В.В., Сенько А.В. Гирорезонансные приборы. Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. 137 с.
22. Аксенчик А.В. Многопучковые лампы бегущей волны О-типа субмиллиметрового диапазона длин волн // Докл. БГУИР. № 5 (75). 2013. С. 48–54.
23. Аксенчик А.В. Широкополосные усилители О-типа терагерцового диапазона частот // Весці нацыянальнай Акадэміі навук Беларусі. 2013. № 3. С. 108–116.
24. Аксенчик А.В. Амплитудные и частотные характеристики регенеративных усилителей О-типа субмиллиметрового диапазона длин волн // Докл. БГУИР. № 6 (76). 2013. С. 5–11.
25. Аксенчик А.В., Кураев А.А., Киринович И.Ф. Моделирование двух-, трехсекционных ЛБВ О-типа терагерцового диапазона частот // Весці нацыянальнай Акадэміі навук Беларусі. 2016. № 1. С. 119–128.
26. Аксенчик А.В., Киринович И.Ф. Двухкаскадные регенеративные усилители О-типа субмиллиметрового диапазона длин волн // Докл. БГУИР. 2016. № 3 (97). С. 31–36.
27. Аксенчик А.В. Моделирование орбоклицстронов-усилителей субмиллиметрового диапазона длин волн // Весці нацыянальнай Акадэміі навук Беларусі. 2013. № 2. С. 118–123.
28. Орбитроны-генераторы субмиллиметрового и миллиметрового диапазонов. Часть I / В.Ф. Кравченко [и др.] // Физические основы приборостроения. 2016. Т. 5, № 2 (19). С. 102–115.

29. Орбиктроны-генераторы субмиллиметрового и миллиметрового диапазонов. Часть II / В.Ф. Кравченко [и др.] // Физические основы приборостроения. 2016. Т. 5, № 3 (20). С. 4–17.
30. Еремка В.Д., Кураев А.А., Сеницын А.К. Клиноорбитрон-усилитель: модель и оптимизированные варианты в диапазоне 180 ГГц. // Матер. Междунар. науч.-техн. конф., приуроченной к 50-летию МРТИ-БГУИР. В 2 ч. Ч. 1. Минск, 2014. С. 40–41
31. Еремка В.Д., Кураев А.А., Матвеев В.В. Терагерцевый клиноорбитрон с азимутальной гребенкой // Радиофизика и электроника. 2017. Т. 22, № 4. С. 62–68.
32. Аксентчик А.В., Кураев А.А., Киринович И.Ф. Усилители и генераторы О-типа миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн (теория и оптимизация). Германия: Palmarium Academic Publishing, 2014. 154 с.
33. Колосов С.В., Кураев А.А., Зайцева И.Е. Новый тип электронного прибора – гиротон на гофрированном резонаторе // Радиофизика та електроніка. 2017. Т. 22, № 3. С. 37–46.
34. Кураев А.А., Матвеев В.В. Релятивистский гелитрон // Докл. БГУИР. 2017. № 3 (105). С. 100–103.
35. Кураев А.А., Матвеев В.В. Безмагнитный клистрон – удвоитель частоты с поперечной модуляцией // Докл. БГУИР. 2018. № 3 (113). С. 67–71.
36. Кураев А.А., Матвеев В.В. Лазер на свободных электронах с электростатическим модулятором // Докл. БГУИР. 2018. № 6 (116). С. 59–64.
37. Кураев А.А., Матвеев В.В., Рак А.О. Двухлучевая лампа обратной волны на спирально изогнутом прямоугольном волноводе // Докл. БГУИР. 2017. № 3 (105). С. 100–103.
38. Лампа бегущей волны: пат. 22050 Респ. Беларусь / А.А. Кураев, В.В. Матвеев, А.О. Рак; дата публ. 30.08.2018.
39. Миллер М.А. Движение заряженных частиц в высокочастотных электромагнитных полях // Изв. вузов. Сер. Радиофизика. 1958. Т. 1, № 3. С. 110–123.
40. Кураев А.А., Сеницын А.К. Коаксиальный диодный генератор-диотрон // Радиотехника и электроника. 1997. Т. 42, № 2. С. 214–219.
41. Кураев А.А., Сеницын А.К. Несинхронное взаимодействие: мнимые противоречия усредненных решений // Радиотехника и электроника. 1997. Т. 42, № 4. С. 468–471.
42. Кравченко В.Ф., Кураев А.А., Сеницын А.К. Несинхронные взаимодействия // Успехи физических наук. 2007. Т. 177, № 5. С. 511–534.
43. Кураев А.А., Попкова Т.Л., Сеницын А.К. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: «ИНФРА-М», 2016. 424 с.
44. Батыгин В.В., Топтыгин И.Н. Сборник задач по электродинамике. М.: ГИФМЛ, 1962. 480 с.

References

1. Kuraev A.A., Popkova T.L., Sinicyan A.K. Moshhnye pribory sverhchastotnyh chastot. Nelinejnaja teorija i chislennaja optimizacija // Dokl. BGUIR. 2014. № 2 (80). S. 73–86. (in Russ.)
2. Kuraev A.A., Matveenko V.V., Popkova T.L. Ustojchivye chislennye metody reshenija ploho obuslovlennyh zadach jelektrodinamiki i nelinejnoj dinamiki // Dokl. BGUIR. 2014. № 3 (97). S. 5–11. (in Russ.)
3. Kurayev A.A., Matveyenko V.V., Popkova T.L. Algorithms with stabilizing coefficients for solving poorly determined radiophysics problems // J. of Radiophysics and Electronics. 2016. Vol. 7 (21), № 3, P. 5–10.
4. Kuraev A.A., Matveenko V.V., Popkova T.L. Algoritm s sil'noj ustojchivost'ju dlja reshenija kraevykh zadach v teorii nereguljarnykh volnovodov // Dokl. BGUIR. 2018. № 8 (118). S. 12–17. (in Russ.)
5. Kuraev A.A., Rak A.O., Sen'ko A.V. Vozbuzhdenie volnovodov i rezonatorov jelektronnyimi potokami // Dokl. BGUIR. 2015. № 3 (89). S. 5–10. (in Russ.)
6. Kuraev A.A., Erjomka V.D., Rak A.O. Vozbuzhdenie volnovodov i rezonatorov jelektronnyimi potokami // Radiofizika i jelektronika. 2015. Т. 6, № 2. S. 68–72. (in Russ.)
7. Kuraev A.A., Matveenko V.V., Popkova T.L. Uravnenija vozbuzhdenija volnovoda s prodol'no-nereguljarnym zapolneniem magnitodijelektrikom // Dokl. BGUIR. 2018. № 4 (114). S. 100–104. (in Russ.)
8. Kuraev A.A., Rak A.O., Popkova T.L. Vozbuzhdenie proizvol'no-nereguljarnogo volnovoda s neodnorodnym zapolneniem anizotropnym dijelektrikom // Dokl. BGUIR. 2015. № 6 (92). S. 5–9. (in Russ.)
9. Kuraev A.A., Matveenko V.V., Popkova T.L. Nereguljarnye jelektrodinamicheskie sistemy. Germanija: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018. 140 s. (in Russ.)
10. Optimal'nye po KPD reljativistskie generatory i usiliteli. Chast' 1 / V.F. Kravchenko [i dr.] // Fizicheskie osnovy priborostroenija. 2012. Т. 1, № 2. S. 41–64. (in Russ.)
11. Optimal'nye po KPD reljativistskie generatory i usiliteli. Chast' 2 / V.F. Kravchenko [i dr.] // Fizicheskie osnovy priborostroenija. 2013. Т. 2, № 1. S. 78–99. (in Russ.)
12. Kuraev A.A., Rak A.O., Gurinovich A.B. Cherenkovskie usiliteli i generatory na nereguljarnykh volnovodah. Germanija: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. 118 s. (in Russ.)

13. Kolosov S.V., Kuraev A.A. Millimetrovyy girotron na vtoroj garmonike ciklotronnoj chastoty // Mater. Mezhdunar. nauch.-tehn. konf., priurochennoj k 50-letiju MRTI–BGUIR. V 2 ch. Ch. 1. Minsk, 2014. S. 34–35. (in Russ.)
14. Kuraev A.A., Matveenko V.V., Sinicyn A.K. Modelirovanie giro-LBV na zamedlennoj E01-mode // Mater. mezhdunar. nauch. konf. «Informacionnye tehnologii i sistemy». Minsk, 2013. S. 218–219. (in Russ.)
15. Generator na ciklotronnom rezonanse: pat. 19572 Resp. Belarus' / A.A. Kuraev, V.V. Matveenko, A.K. Sinicyn; data publ. 30.10.2015. (in Russ.)
16. Girotrony i giro- LBV na zamedlennoj E₀₁-mode gofirovannogo volnovoda / V.F. Kravchenko [i dr.] // Fizicheskie osnovy priborostroenija. 2015. T. 4, № 4 (17). S. 40–55. (in Russ.)
17. Kravchenko V.F., Kuraev A.A., Matveenko V.V. Korotkovolnovye girotrony s zerkal'nymi rezonatorami // Fizicheskie osnovy priborostroenija. 2017. T. 6, № 3 (25). S. 28–37. (in Russ.)
18. Kuraev A.A., Matveenko V.V. Perspektivnye modifikacii girorezonansnyh priborov // Dokl. BGUIR. 2017. № 8 (110). S. 26–32. (in Russ.)
19. Kuraev A.A., Matveenko V.V. Selekcija mod H_{0in} i E_{1in} v cilindricheskom rezonatore s krugovym secheniem // Dokl. BGUIR. 2017. № 5 (107). S. 85–89. (in Russ.)
20. Kuraev A.A., Matveenko V.V., Sinicyn A.K. Issledovanie vlijanija nekotoryh faktorov na jeffektivnost' peniotrona // Mater. Mezhdunar. nauch.-tehn. konf., priurochennoj k 50-letiju MRTI–BGUIR. V 2 ch. Ch. 1. Minsk, 2014. S. 42–43. (in Russ.)
21. Kuraev A.A., Matveenko V.V., Sen'ko A.V. Girorezonansnye pribory. Germanija: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. 137 s. (in Russ.)
22. Aksenchik A.V. Mnogopuchkovye lampy begushhej volny O-tipa submillimetrovogo diapazona dlin voln // Dokl. BGUIR. № 5 (75). 2013. S. 48–54. (in Russ.)
23. Aksenchik A.V. Shirokopolosnye usiliteli O-tipa teragercovogo diapazona chastot // Vesci nacyjanal'naj Akadziejii navuk Belarusi. 2013. № 3. S. 108–116. (in Russ.)
24. Aksenchik A.V. Amplitudnye i chastotnye charakteristiki regenerativnyh usilitelej O-tipa submillimetrovogo diapazona dlin voln // Dokl. BGUIR. № 6 (76). 2013. S. 5–11. (in Russ.)
25. Aksenchik A.V., Kuraev A.A., Kirinovich I.F. Modelirovanie dvuh-, trehsekcionnyh LBV O-tipa teragercovogo diapazona chastot // Vesci nacyjanal'naj Akadziejii navuk Belarusi. 2016. № 1. S. 119–128. (in Russ.)
26. Aksenchik A.V., Kirinovich I.F. Dvuhkaskadnye regenerativnye usiliteli O-tipa submillimetrovogo diapazona dlin voln // Dokl. BGUIR. 2016. № 3 (97). S. 31–36. (in Russ.)
27. Aksenchik A.V. Modelirovanie orboklistronov-usilitelej submillimetrovogo diapazona dlin voln // Vesci nacyjanal'naj Akadziejii navuk Belarusi. 2013. № 2. S. 118–123. (in Russ.)
28. Orbiktrony-generatory submillimetrovogo i millimetrovogo diapazonov. Chast' I / V.F. Kravchenko [i dr.] // Fizicheskie osnovy priborostroenija. 2016. T. 5, № 2 (19). S. 102–115. (in Russ.)
29. Orbiktrony-generatory submillimetrovogo i millimetrovogo diapazonov. Chast' II / V.F. Kravchenko [i dr.] // Fizicheskie osnovy priborostroenija. 2016. T. 5, № 3 (20). S. 4–17. (in Russ.)
30. Eremka V.D., Kuraev A.A., Sinicyn A.K. Klinoorbiktron-usilitel': model' i optimizirovannye varianty v diapazone 180 GGc. // Mater. Mezhdunar. nauch.-tehn. konf., priurochennoj k 50-letiju MRTI–BGUIR. V 2 ch. Ch. 1. Minsk, 2014. S. 40–41. (in Russ.)
31. Eremka V.D., Kuraev A.A., Matveenko V.V. Teragercevyj klinoorotron s azimutal'noj grebenkoj // Radiofizika i jelektronika. 2017. T. 22, № 4. S. 62–68. (in Russ.)
32. Aksenchik A.V., Kuraev A.A., Kirinovich I.F. Usiliteli i generatory O-tipa millimetrovogo i submillimetrovogo diapazonov dlin voln (teorija i optimizacija). Germanija: Palmarium Academic Publishing, 2014. 154 s. (in Russ.)
33. Kolosov S.V., Kuraev A.A., Zajceva I.E. Novyj tip jelektronnogo pribora – girotron na gofirovannom rezonatore // Radiofizika ta elektronika. 2017. T. 22, № 3. S. 37–46. (in Russ.)
34. Kuraev A.A., Matveenko V.V. Reljativistskij gelitron // Dokl. BGUIR. 2017. № 3 (105). S. 100–103. (in Russ.)
35. Kuraev A.A., Matveenko V.V. Bezmagnitnyj klistron – udvoitel' chastoty s poperechnoj moduljaciej // Dokl. BGUIR. 2018. № 3 (113). S. 67–71. (in Russ.)
36. Kuraev A.A., Matveenko V.V. Lazer na svobodnyh jelektronah s jelektrostaticheskim moduljatorom // Dokl. BGUIR. 2018. № 6 (116). S. 59–64. (in Russ.)
37. Kuraev A.A., Matveenko V.V., Rak A.O. Dvuhluhevaja lampa obratnoj volny na spiral'no izognutom prjamougol'nom volnovode // Dokl. BGUIR. 2017. № 3 (105). S. 100–103. (in Russ.)
38. Lampa begushhej volny: pat. 22050 Resp. Belarus' / A.A. Kuraev, V.V. Matveenko, A.O. Rak; data publ. 30.08.2018. (in Russ.)
39. Miller M.A. Dvizhenie zarjzhennyh chastic v vysokochastotnyh jelektromagnitnyh poljah // Izv. vuzov. Ser. Radiofizika. 1958. T. I, № 3. S. 110–123. (in Russ.)
40. Kuraev A.A., Sinicyn A.K. Koaksial'nyj diodnyj generator-diotron // Radiotehnika i jelektronika. 1997. T. 42, № 2. S. 214–219. (in Russ.)

41. Kuraev A.A., Sinicyn A.K. Nesinhronnoe vzaimodejstvie: mnimye protivorechija usrednennyh reshenij // Radiotekhnika i jelektronika. 1997. T. 42, № 4. S. 468–471. (in Russ.)
42. Kravchenko V.F., Kuraev A.A., Sinicyn A.K. Nesinhronnye vzaimodejstvija // Uspehi fizicheskikh nauk. 2007. T. 177, № 5. S. 511–534. (in Russ.)
43. Kuraev A.A., Popkova T.L., Sinicyn A.K. Jelektrodinamika i rasprostranenie radiovoln. M.: «INFRA-M», 2016. 424 s. (in Russ.)
44. Batygin V.V., Toptygin I.N. Sbornik zadach po jelektrodinamike. M.: GIFML, 1962. 480 s. (in Russ.)

Сведения об авторах

Кураев А.А., д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Матвеев В.В., к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры вычислительных методов и программирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293- 89-56;
e-mail kurayev@bsuir.by
Кураев Александр Александрович

Information about the authors

Kurayev A.A., D.Sci, professor, professor of information radiotechnologies department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Matveyenka V.V., PhD, associate professor, associate professor of computational methods and programming department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka, st., 6
Belarusian state university
of informatics and radioelectronics
tel. +375-17-293- 89-56;
e-mail: kurayev@bsuir.by
Kurayev Alexander Alexandrovich

УДК 538.945

КВАЗИОДНОМЕРНЫЕ СВЕРХПРОВОДНИКИ НА ПОРИСТЫХ КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ

С.Л. ПРИЩЕПА

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 18 февраля 2019

Аннотация. Рассматривается применение подложек из пористого кремния для целей сверхпроводниковой наноэлектроники. Особое внимание уделяется влиянию морфологии пор (пористость, средний диаметр пор) на сверхпроводящие свойства ультратонких пленок на пористых подложках. Продемонстрировано, что подобным образом можно получить связанную сеть одномерных сверхпроводящих нанопроводов для разработки и использования нового класса высокочувствительных радиационных детекторов, магнетометров, кубитов и транзисторов на основе эффекта проскальзывания фазы, а также квантовых стандартов тока.

Ключевые слова: пористые кремниевые подложки, ультратонкие пленки сверхпроводника, сеть нанопроводов, термические флуктуации, квантовое тунелирование.

Abstract. The use of porous silicon in the field of superconducting nanoelectronics is considered. The attention focuses on the influence of the morphology of the pores (porosity, average pore diameter) on the superconducting properties of ultrathin films deposited on these templates. It's shown that within this fabrication procedure we can obtain networks of one-dimensional superconducting nanowires, which exhibit features typical of Quantum Phase Slip (QPS) phenomena. This creates preconditions for the development and implementation of new highly-sensitive radiation detectors, magnetometers, QPS qubits, QPS transistors and quantum current standards.

Keywords: Porous silicon templates, ultrathin superconducting film, nanowire network, thermal fluctuations, quantum tunneling.

Doklady BGUIR. 2019, Vol. 120, No. 2, pp. 28-38

Quasi one-dimensional superconductors on porous silicon templates

S.L. Prischepa

Введение

Ряд интересных явлений наблюдалось в пленках сверхпроводников II рода, выращенных на подложках с упорядоченными центрами пиннинга, обладающими размерами порядка длины когерентности. Исторически первыми пористыми подложками, на которых были реализованы подобного рода наноструктурированные сверхпроводники (т. е. когда пленка сверхпроводника осаждалась на пористую подложку), были пористые анодные оксиды алюминия [1]. В них диаметр пор варьировался в диапазоне от 25 до 200 нм при пористости порядка 50 %. На таких системах были получены доказательства возможности реализации наноперфорированных систем на самоорганизующихся подложках [2].

Подложки на основе пористого кремния (ПК) представляются более перспективными самоорганизующимися подложками для сверхпроводников, поскольку кремний является стандартной подложкой для осаждения Nb и NbN, наиболее распространенных материалов сверхпроводниковой наноэлектроники. ПК представляет собой развитую сеть пор в нанокристаллической кремниевой матрице и является материалом, представляющим значительный интерес в различных областях науки и техники. Возможность изменения

пористости ПК до значений, гораздо больших 50 %, приводит к уникальной возможности – использованию подложек из ПК для создания одномерных (1D) сверхпроводников и/или связанных сеток 1D сверхпроводящих каналов или нанопроводов (СНП). 1D сверхпроводимость осуществляется, когда ширина сверхпроводящей полоски между порами становится сравнимой или менее, чем длина когерентности сверхпроводника ξ . Морфология такой наноструктурированной пленки схематически показана на рис. 1.

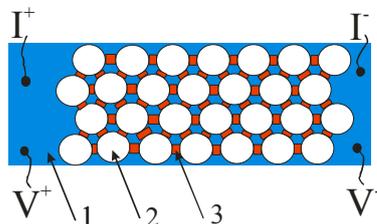


Рис. 1. Схематическое изображение геометрии сверхпроводящих нанопроводов, сформированных на основе пленки, осажденной на пористую подложку: 1 – пленка сверхпроводника, 2 – пора, 3 – нанопровод (сужение). Показано также расположение токовых и потенциальных контактов

Поведение 1D сверхпроводников во многом определяется эффектами проскальзывания фазы за счет как термических (TAPS), так и квантовых (QPS) флуктуаций [3, 4]. Это диссипативные процессы, которые препятствуют полному переходу 1D сверхпроводника в состояние с нулевым сопротивлением даже при температурах, много меньших T_c . Многосвязанная область нанопроводов может являться основой таких сверхпроводящих устройств, как магнетометры и радиационные детекторы [5]. Недавно был продемонстрирован дуализм между Джозефсоновскими переходами и QPS эффектами [6], что значительно усилило интерес к подобным малоразмерным наноструктурам. Конечной целью подобных исследований является создание кубитов на основе QPS [7], QPS транзисторов [8] и квантовых стандартов тока [9].

В силу вышесказанного подход к формированию нанопроводов стал сам по себе самостоятельной исследовательской областью, включающей ионно-лучевой дизайн, молекулярные шаблоны, осаждение внутри или на поверхности нанопористых самоорганизованных подложек [10–12]. Последнее является особенно привлекательным, поскольку это позволяет формировать наноструктурированную пленку в одном цикле, быстро, дешево, с высокой воспроизводимостью и на больших площадях. Поэтому для применений в сверхпроводниковой наноэлектронике важно рассмотреть следующие параметры: средний диаметр пор \varnothing , пористость P (определяет среднее расстояние между порами Λ) и качество кремниевой поверхности в межпоровом пространстве, которое влияет на качество сверхпроводящей пленки. Если материал подложки загрязняет сверхпроводник, то такая подложка не может использоваться в производстве устройств. Диаметр пор ПК легко меняется от микронных до нанометровых, используя соответствующий уровень легирования кремния и режимы анодирования. Пористость зависит от параметров электрохимического процесса и варьируется от 20 до 95 %.

Сеть связанных 1D нанопроводов из Nb

Подложки из ПК формировались на основе пластин КЭС 001 по стандартной методике [13]. Номинальные морфологические параметры составляли: $\varnothing = 10\text{--}15$ нм, $\Lambda = 40\text{--}50$ нм. После чего на подложку осаждалась пленка Nb методом магнетронного распыления на постоянном токе толщиной не более 15 нм, что позволяло получить наноперфорированную пленку (рис. 2).

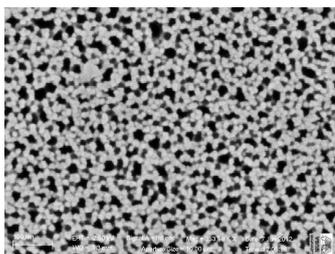


Рис. 2. Морфология тонкой пленки Nb ($d_{Nb} = 3,5$ нм) на ПК с $\varnothing = 15$ нм и $\Lambda = 50$ нм

Малые толщины пленки Nb приводят к тому, что материал осаждается только в межпоровом пространстве и сеть связанных нанопроводов формируется сразу после осаждения. При этом средняя ширина нанопровода w определяется диаметром поры (рис. 2). Для усиления роли квантовых флуктуаций образцы подвергались фотолитографии или электронной литографии (ЭЛЛ) для формирования полосок с ограниченным количеством нанопроводов. После фотолитографии размеры полосок составляли: 10 мкм – ширина, 100 мкм – длина [14]. После ЭЛЛ ширина составляла 1,67 мкм и длина 30 мкм [15]. В результате количество связанных нанопроводов было оценено как $N \approx 250$ после фотолитографии и $N \approx 30$ после ЭЛЛ. Резистивные переходы $R(T)$ для этих образцов показаны на рис. 3. Отметим, что сопротивление в нормальном состоянии R_n , толщина пленки d_{Nb} , ширина нанопровода w_b были одинаковы для этих образцов, $R_n \approx 10$ Ом, $d_{Nb} = 12$ нм, $w_b \approx 20\text{--}30$ нм.

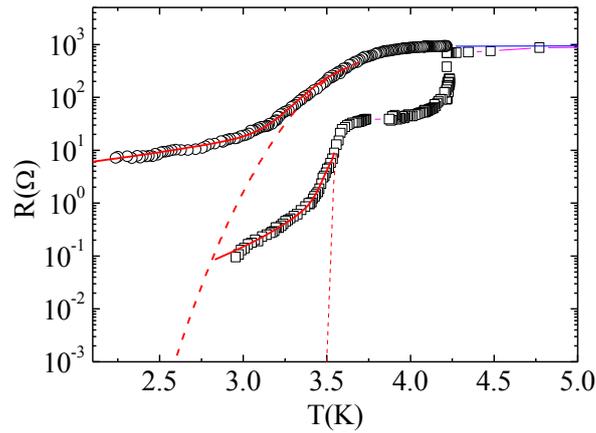


Рис. 3. Зависимость сопротивления от температуры для сети наносвязанных нанопроводов после фото (\square) и электронной литографии (\circ)

Экспериментальные данные описывались выражением

$$R(T) = \left[R_n^{-1} + (R_{TAPS} + R_{QPS})^{-1} \right]^{-1}, \quad (1)$$

где R_{TAPS} и R_{QPS} определяют вклады термических и квантовых флуктуаций соответственно.

$$R_{TAPS} \sim \sqrt{F(T)/k_B T} \exp[-F(T)/k_B T], R_{QPS}(T) \approx A \frac{R_Q^2}{R_N} / \frac{L^2}{\xi^2(0)} \exp\left[-A \frac{R_Q}{R_N} \frac{L}{\xi(T)}\right] [15].$$

Подгонка экспериментальных данных по формуле (1) показана на рис. 3. Пунктирные линии построены с учетом только вклада термических флуктуаций. Сплошные линии учитывают и вклад квантовых флуктуаций. Хорошее согласие теории и эксперимента в последнем случае указывает на определяющую роль квантовых флуктуаций.

Роль квантовых флуктуаций сказывается и на виде вольт-амперных характеристик (ВАХ), измеренных при разных значениях магнитного поля. Такие ВАХ для образца после ЭЛЛ показаны на рис. 4. Диапазон магнитных полей менялся от 0,01 до 0,12 Тл. Экспериментальные данные подгонялись с учетом обоих активационных вкладов:

$$V_{TAPS} = \frac{2\pi\hbar}{e} \gamma_{TAPS} \sinh\left(\frac{\hbar I}{4ek_B T}\right), \quad (2)$$

где $\gamma_{TAPS} \sim (R_{TAPS}/R_Q)(k_B T/\hbar)$.

Вклад QPS при низких температурах записывается как

$$V_{QPS} \sim I^{2\mu-1}, \quad (3)$$

где $\mu = R_Q/R_{qp}$, R_{qp} – сопротивление порядка R_n . Наилучшее согласие с экспериментом было получено с использованием уравнения (3), линии на рис. 4.

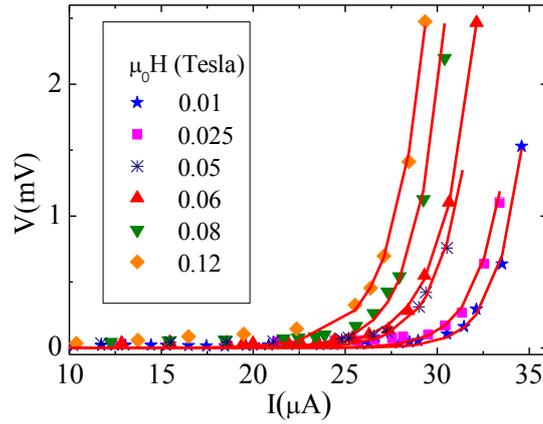


Рис. 4. Измеренные ВАХ при $T = 2,2$ К образца после электронной литографии

При уменьшении диаметра пор растет когерентность взаимодействия нанопроводов. В результате были обнаружены осцилляции зависимостей $R(H)$ [16]. На рис. 5 показан этот результат для пленки Nb толщиной 8,5 нм на ПК с $\varnothing \approx 10$ нм, $\Lambda \approx 40$ нм и $w \approx 30$ нм. Эффект лучше проявляется на первой производной dR/dH , из которой видно, что осцилляции присущи всему температурному диапазону перехода в сверхпроводящее состояние [17]. В то время как резистивный переход указывает на присутствие флуктуаций параметра порядка, магнеторезистивный переход указывает на наличие когерентных эффектов и свидетельствует о многосвязности нанопроводов. На рис. 6 приведены абсолютные значения осцилляций ΔR при двух температурах: 2,88 К (нижняя панель) и 2,91 К (верхняя панель). Из рис. 6 следует, что осцилляции сопротивления носят периодический или квазипериодический характер, что свидетельствует о множественности замкнутых токовых контуров. Самый большой период, $\Delta H = 300$ Э, который соответствует самой маленькой площади токового контура, наблюдается вплоть до $H = 4$ кЭ. Наличие магнитных примесей в порах могут усилить этот эффект [18, 19].

Наиболее вероятное объяснение наблюдаемой периодичности кривых $R(H)$ – нанопроводной квантовый интерференционный детектор. Это понятие было введено в 2005 году при рассмотрении поведения двух параллельных нанопроводов [5]. Каждый из них ведет себя как нанопровод, а в паре с другим наблюдается фазовая когерентность параметра порядка. В результате магнетосопротивление устройства определяется не только магнитным потоком, замкнутым на площади $2cb$, но и эффективной площадью $4cl$.

$$H = \left[\left(\frac{\Phi_0}{4cl} \right)^{-1} + \left(\frac{\Phi_0}{2cb} \right)^{-1} \right]^{-1}. \quad (4)$$

В формуле (4) b – длина нанопровода, $2c$ – расстояние между ними и $2l$ – ширина сверхпроводящих мезоскопических контактов.

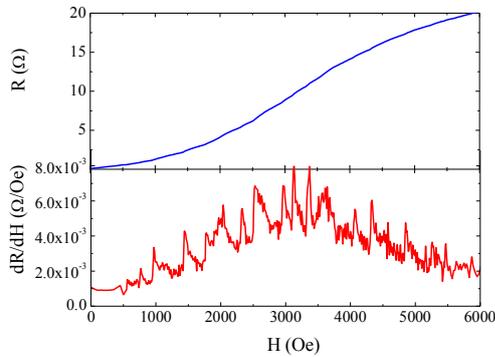


Рис. 5. Зависимость $R(H)$ и $dR/dH(H)$ для пленки Nb на ПК при $T = 2,91$ К

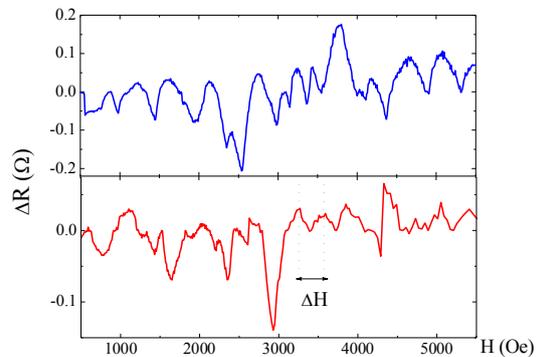


Рис. 6. Зависимость $\Delta R(H)$ для пленки Nb на ПК при $T = 2,91$ К и 2,88 К

Сеть связанных 1D нанопроводов из NbN

Для осаждения пленок NbN использовались образцы монокристаллического кремния *p*-типа. Толщина слоя анодного оксида составляла 1,5 мкм, среднее расстояние между центрами пор $a = 2\varnothing$, так что $w = \varnothing$. В работе использовались три разные подложки ПК со средним диаметром пор $\varnothing = 5, 7,5$ и 10 нм, так что во всех случаях $w \approx \xi$. В дальнейшем они будут обозначены как образцы ПК5, ПК7 и ПК10. На рис.7, *a* приведены изображения сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) поверхности образца ПК10. Средний диаметр пор, измеренный статистически на различных участках образца, согласуется с номинальным значением $\varnothing = 10$ нм [14].

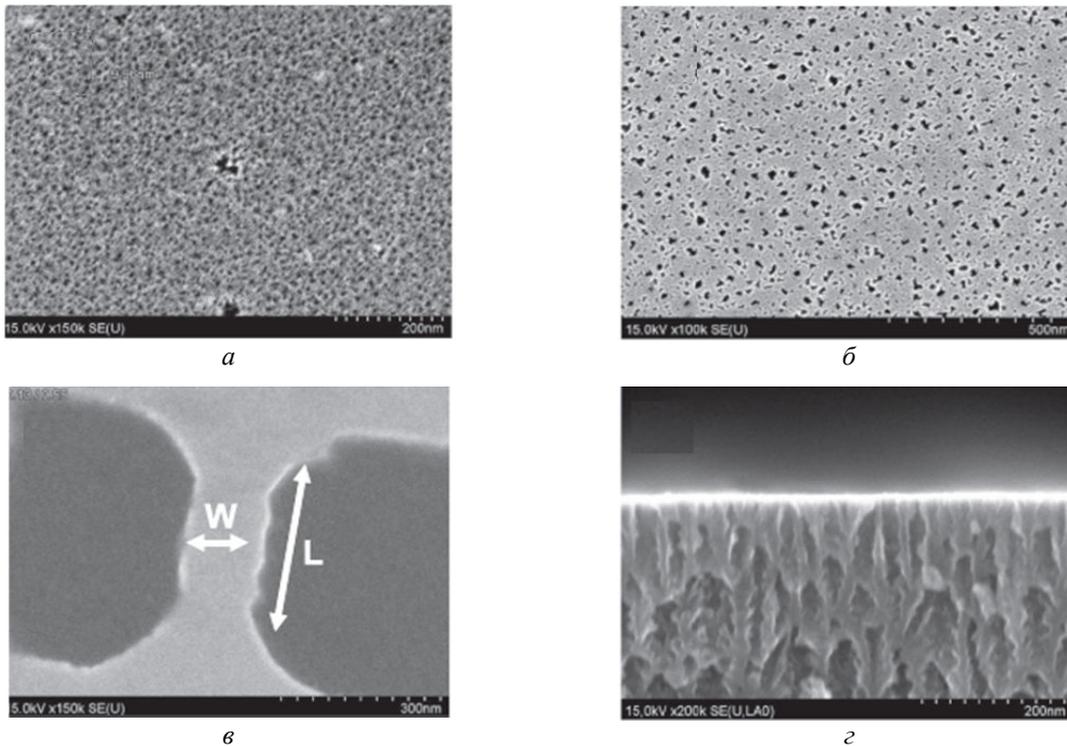


Рис. 7. Изображения СЭМ подложки ПК10 (*a*), образца ПК10-3.7 (*б*), нанополоски NbN шириной $W = 65$ нм и длиной $L = 270$ нм на ПК10-3.7 (*в*), поперечного сечения образца ПК10-3.7 после ЭЛЛ (*г*)

Ультратонкие пленки NbN осаждались методом магнетронного распыления на постоянном токе в потоке Ar скоростью $60 \text{ см}^3/\text{мин}$ и $\text{N}_2 - 6,5 \text{ см}^3/\text{мин}$. Исходное давление в вакуумной камере составляло 10^{-8} Тор, давление в камере в процессе распыления – $3,2 \times 10^{-3}$ Тор. Скорость осаждения определялась измерением толщины пленки d_{NbN} на подложку Si/SiO₂ частично закрытой механической маской и выдерживаемой при фиксированной температуре T_s . Полученные значения составляли $0,41 \text{ нм/с}$ при $T_s = 300^\circ \text{C}$ и $0,27 \text{ нм/с}$ при $T_s = 500^\circ \text{C}$. Исследовались образцы с различной толщиной $d_{\text{NbN}} \sim \xi$. Образцы ПК/NbN обозначались номером подложки с последующим указанием толщины d_{NbN} в нанометрах. Так, ПК5-5.6 означает, что толщина пленки NbN 5,6 нм и она осаждена на подложку ПК5. На рис. 7, *б* показано СЭМ изображение образца ПК10-3.7, полученного при $T_s = 300^\circ \text{C}$. Присутствие пор очевидно, что подтверждает пористую морфологию пленки NbN на ПК.

Затем пленки NbN подвергались ЭЛЛ с тем, чтобы сформировать полоски шириной W в диапазоне от 60 до 320 нм и длиной $L = 270-1370$ нм. Для этого негативный резист ma-N 2403 наносился на поверхность образца при скорости вращения 6000 об/мин в течение 1 мин, что соответствовало приблизительно толщине 180 нм. Затем он нагревался до 95°C и выдерживался в течение 1 мин. Использовалась ЭЛЛ с прямым лучом в системе JEOL JBX-9300FS. Резист подвергался экспозиции при использовании электронного тока в 1 нА с дозой 220 мкС/см^2 , затем он обрабатывался проявителем MF-CD-26 в течение 45 с и промывался деионизованной водой и высушивался под струей азота. Незакрытый NbN

травился реактивным ионным травлением в NF_3 в течение 16 с. Для остановки процесса травления использовался лазерный интерферометр. После этого резист удалялся полностью. Различные значения W требовались, чтобы получить сетку из СНП с различным N вдоль направления тока ($N \sim W/2\varnothing$), см. рис. 7, б. Например, полоска с $W = 60$ нм, полученная на образце ПК5-3.7, состоит из $N \sim 6$ СНП. На рис. 7, в показано СЭМ изображение полоски $W = 65$ нм и $L = 270$ нм. Присутствие пор в пленке NbN было подтверждено изображением поперечного сечения образца ПК10-3.7, полученное после ЭЛЛ, рис. 7, г. Из этого рисунка следует, что пористая структура сохраняется вплоть до поверхности образца [20].

Для того чтобы получить сетку СНП на пористой подложке, необходимо заполнить сверхпроводником межпоровое пространство подложки, но при этом поры должны оставаться свободными от осаждаемого материала. Это требование определяет толщину материала относительно диаметра пор, а также температуру подложки. В частности, толстый слой NbN будет неизбежно заполнять поры, покрывая сплошным слоем всю подложку. Более того, для больших значений d_{NbN} поры могут играть роль дефектов в подслое NbN, в которых сверхпроводимость будет подавлена. С другой стороны, малые значения d_{NbN} приводят к формированию несплошной пленки и нарушению путей для протекания тока. Высокие T_s увеличивают диффузию по поверхности, что также может привести к тому, что тонкая пленка будет несплошной. Следовательно, для экспериментального подбора приемлемых параметров образцов, изготавливались несколько образцов с разными d_{NbN} , осажденными на разные подложки при разных условиях. Для самого толстого образца, $d_{\text{NbN}} = 7,2$ нм, осажденного при $T_s = 300$ °С на ПК5, ПК7 и ПК10, значение T_c (определенное при $R = 0,5R_N$, где R_N – сопротивление в нормальном состоянии перед началом перехода в сверхпроводящее состояние) росло с ростом \varnothing . Этот результат говорит о том, что пленка NbN покрывает всю поверхность подложки, включая поры, которые в этом случае ведут себя как дефекты. Когда размер дефектов становится меньше (что происходит, когда \varnothing снижается), регистрируется рост критической температуры T_c на 0,4 К.

Для самого тонкого образца было получено, что только ПК10-2.7 имел полный сверхпроводящий переход. Образец ПК7-2.7 не достигал состояния с $R = 0$, а образец ПК5-2.7 имел диэлектрический характер зависимости $R(T)$. Эти результаты могут быть интерпретированы следующим образом: для ультратонких пленок NbN полный перколяционный путь для тока создается только на подложке ПК10, которая характеризуется максимальным w . В отличие от предыдущего случая, T_c уменьшается как функция w , что и должно происходить, когда размер сверхпроводящего образца уменьшается [20]. В промежуточном случае, $d_{\text{NbN}} = 3,7$ нм, опять T_c уменьшается с уменьшением w . Для этой толщины NbN поры еще не заполнены, и пленка растет на границах между порами, формируются перколяционные участки между потенциальными контактами. Как результат, формируется сетка СНП по всей подложке.

Эффект влияния температуры исследовался при осаждении пленки NbN толщиной 3,7 нм при $T_s = 500$ °С. В этом случае не было обнаружено существенного изменения критической температуры при осаждении на ПК5, ПК7 и ПК10. Более того, значения T_c остаются неизменными по сравнению с образцами на Si/SiO₂ подложке. Возможно, что высокая подвижность NbN при высокой температуре подложки вызывает закоротки через поры, так что сетка СНП больше не формируется. Таким образом, было установлено, что наилучшие условия роста наносеток их СНП были реализованы для толщины нитрида ниобия 3,7 нм при температуре подложки 300°С. В силу этого представлены результаты для образца ПК5-3.7, в котором реализовался 1D случай ($d_{\text{NbN}} \sim w \sim \xi$). Примеры описанных выше зависимостей $R(T)$ для разных образцов приведены на рис. 8–10.

Оценка удельного сопротивления ρ сетки СНП представляет собой самостоятельную нетривиальную задачу. Без знания этой величины невозможно рассчитать и оценить параметры наносеток и механизмы проскальзывания фазы. Измеряя зависимость верхнего критического поля от температуры $H_{c2}(T)$, оценим коэффициент диффузии $D = -\frac{1,097}{\mu_0 dH_{c2} / dT} \Big|_{T=T_c}$ и длину когерентности при $T = 0$, $\xi(0)$. Зависимость $H_{c2}(T)$ определяли из измерения резистивных переходов при разных значениях перпендикулярного магнитного поля. Зависимости $H_{c2}(T)$ для образца ПК5-3.7 при магнитных полях 0; 1; 2,5; 4; 5; 6 и 8 Тл показаны на рис. 11.

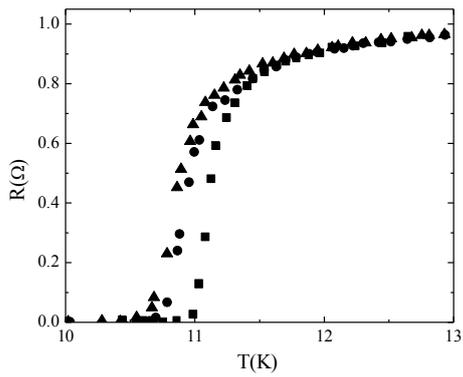


Рис. 8. Резистивные переходы в сверхпроводящее состояние для трех образцов сеток СНП толщиной 7,2 нм на разных подложках: ПК5-7.2 (\blacktriangle), ПК7-7.2 (\bullet) и ПК10-7.2 (\blacksquare)

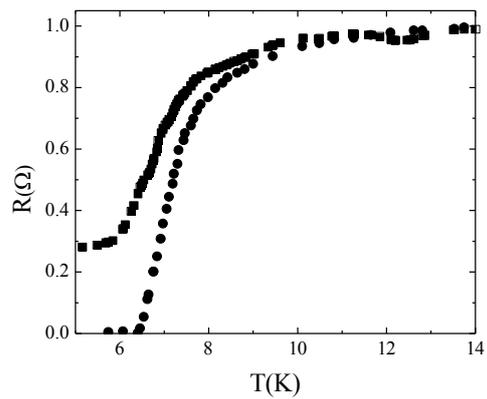


Рис. 9. Переходы в сверхпроводящее состояние двух образцов сеток СНП одинаковой толщины 2,7 нм на разных подложках: ПК 7-2.7 (\blacksquare) и ПК10-2.7 (\bullet)

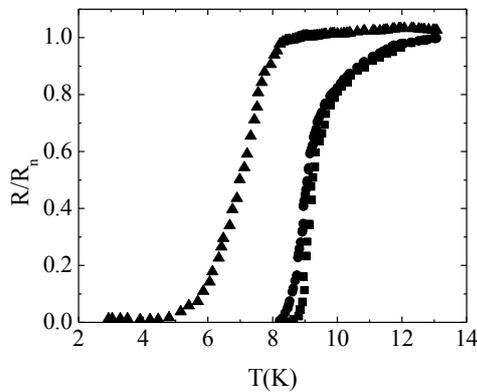


Рис. 10. Резистивные переходы в сверхпроводящее состояние для трех образцов сеток СНП одинаковой толщины 5,0 нм на разных подложках: ПК5-5 (\blacktriangle), ПК7-5 (\bullet) и ПК10-5 (\blacksquare)

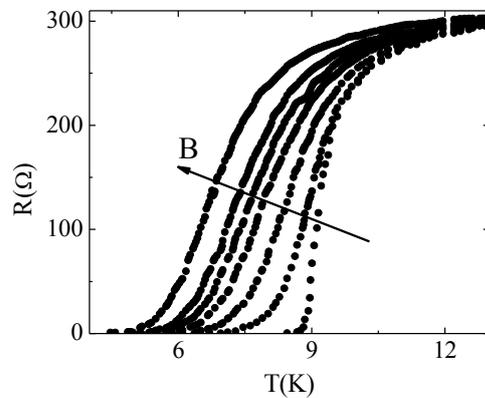


Рис. 11. Резистивные переходы в сверхпроводящее состояние образца ПК5-3.7, измеренные при разных значениях перпендикулярного магнитного поля

На рис. 12 показана зависимость перпендикулярного критического поля H_{c2} от приведенной температуры T/T_c для сетки СНП толщиной 3,7 нм на подложках ПК5, ПК7 и ПК10. Данные получены из анализа кривых $R(T, B)$, аналогичных тем, которые приведены на рис. 11.

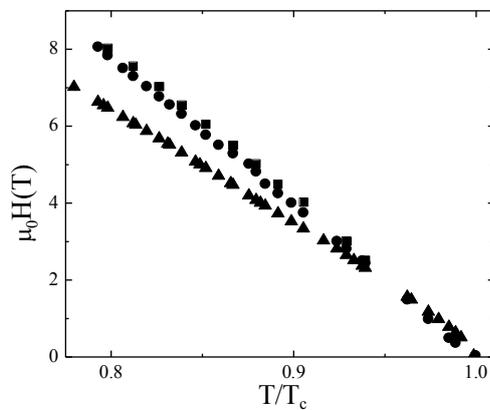


Рис. 12. Верхнее перпендикулярное критическое поле H_{c2} как функция температуры для сеток СНП толщиной 3,7 нм на подложках ПК5 (\blacksquare), ПК7 (\bullet) и ПК10 (\blacktriangle)

Для образца ПК5-3.7 было получено $D = 0,19 \text{ см}^2/\text{с}$. Учитывая время рассеяния электронов в нанопроводах из NbN, известное из литературы, $\tau \approx 3 \times 10^{-15} \text{ с}$ [20], получаем длину свободного пробега $l = \sqrt{3D\tau} \approx 0,5 \text{ нм}$. Зная, что для нитрида ниобия $\rho l \approx 10^{-5} \text{ мкОм} \times \text{см}^2$ [20], получаем для низкотемпературного удельного сопротивления нитрида ниобия величину $\rho \approx 200 \text{ мкОм} \times \text{см}$. В предположении линейной зависимости верхнего критического магнитного поля от температуры возможно также оценить длину когерентности сверхпроводника, поскольку $\mu_0 H_{c2} = \frac{\Phi}{2\pi\xi^2(0)}$, где Φ – квант магнитного потока. В результате получаем $\xi(0) = 2,91 \text{ нм}$. Это означает, что исследуемый образец находится в «грязном» пределе, $l < \xi(0)$.

Эволюция сверхпроводящего состояния в 1D наноразмерных образцах

Рассмотрим подробнее эволюцию сверхпроводящего состояния в образце ПК5-3.7 после того, как методом ЭЛЛ из него сформированы нанополоски разной ширины. На рис. 13 приведены измеренные кривые переходов в сверхпроводящее состояние $R(T)$ для трех значений ширины полосок: $W = 65, 130$ и 320 нм . Количество нанопроводов, соответствующее этим значениям ширины, составляет соответственно $N = 6, 13$ и 32 . Все наноструктуры имели хорошо выраженное начало сверхпроводящего перехода при $T_c^{\text{onset}} \approx 9 \text{ К}$, измеренное согласно критерию $R = 0,9R_n$. Это значение T_c^{onset} было лишь незначительно меньше, чем аналогичное для образца без литографии на сплошной подложке. Этот экспериментальный факт подтверждает формирование перколяционного пути вдоль всей полоски нитрида ниобия, а также то, что сверхпроводящее состояние сформировано. Зависимости $R(T)$ на рис. 13 имеют разную форму, что указывает на различные механизмы при низких температурах. Для $N = 32$ сопротивление меняется на семь порядков ниже T_c^{onset} , достигая $0 (< 10^{-3} \text{ Ом})$ в пределах погрешности измерительной аппаратуры. С другой стороны, для меньших значений N было измерено конечное значение сопротивления при низких температурах ($T = 2 \text{ К}$). В случае $N = 6$ сопротивление при 2 К в 10^3 раз больше, чем для образца с $N = 13$.

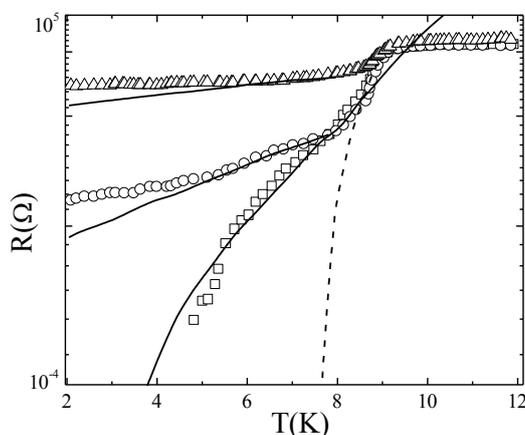


Рис. 13. Резистивные переходы в сверхпроводящее состояние нанополосок из ПК5-3.7 с различным количеством СНП: $N = 32$ (\square), 13 (\circ), 6 (Δ). Линии – результат расчетов с использованием подгоночных параметров, указанных в таблице. Пунктирная линия – модель TAPS, сплошные линии – квантовая природа QPS

Результаты были проанализированы в рамках теоретической модели, предложенной для 1D сверхпроводников длиной Λ в присутствии как TAPS, так и QPS. Так, в случае тепловых флуктуаций данные фитировались согласно выражению

$$R_{TAPS} \sim R_Q \frac{\Lambda}{\xi(T)} \frac{T_c}{T} \sqrt{\frac{U(T)}{k_B T}} \exp\left(-\frac{U(T)}{k_B T}\right), \quad (5)$$

где $U(T) = U(0)(1 - T/T_c)^{3/2}$ – это энергия активации ЦПФ, а $\xi(T) = \xi(0)\sqrt{1 - T/T_c}$ – температурно-зависимая длина когерентности. Энергия активации при нулевой температуре выражается как

$$U(0) \approx 0,83 \frac{S}{\xi(0)} \frac{R_Q}{\rho} k_B T_c, \quad (6)$$

где $S = tw$, а $R_Q = h/4e^2 = 6,45$ кОм – квант сопротивления.

В случае доминирования квантовых флуктуаций имеем [20]

$$R_{QPS}(T) = \frac{\hbar \Gamma_{QPS}}{2el}, \quad (7)$$

где

$$\Gamma_{QPS} = \frac{S_{QPS}}{\tau_0} \frac{\Lambda}{\xi(T)} \exp(-S_{QPS}). \quad (8)$$

Здесь Γ_{QPS} – активационная скорость квантовых ЦПФ, $\tau_0 = \hbar/\Lambda$ – характеристическое время сверхпроводящего состояния, а

$$S_{QPS} = A \left(\frac{R_0}{R_N} \right) \left(\frac{\Lambda}{\xi(T)} \right) \quad (9)$$

есть действие квантового центра проскальзывания фазы с численной константой A порядка единицы [20].

В рамках обозначенного теоретического подхода остается лишь малое число подгоночных параметров. Так, для термически активированного процесса имеем два подгоночных параметра: длина одномерного сверхпроводящего канала Λ и энергия активации при нулевой температуре $U(0)$. Для квантовых флуктуаций подгоночными параметрами являются Λ и численный коэффициент A . Наилучшее согласие между экспериментом и теорией для образцов с $N = 32$ и $N = 13$ было получено при рассмотрении возможностей обоих типов флуктуаций: тепловых (пунктирная линия на рис. 13, построенная по уравнению (5)) и квантовых (сплошные линии на рис. 13, построенные по уравнению (7)). Однако если тепловые флуктуации доминируют при высоких температурах (начало сверхпроводящего перехода), то квантовые проявляются при низких, на конце сверхпроводящего перехода.

Для образца с меньшим количеством СНП ($N = 6$), уменьшение количества нанопроводов приводит к существенному «затягиванию» сверхпроводящего перехода, который может быть профиттирован лишь с учетом квантовых флуктуаций, описываемых уравнением (7).

В целом следует отметить, что согласие между экспериментом и теорией очень неплохое, особенно если учесть тот факт, что уравнения (5) и (7) были получены всего лишь для одного СНП. В нашем же эксперименте мы имеем дело с сеткой нанопроводов неоднозначной длины, конечной ширины и с распределением активационных энергий. Полученные в результате подгоночной процедуры значения параметров приведены в таблице.

Параметры образцов ПК5-3.7, полученные при воспроизведении зависимостей $R(T)$ с разным количеством СНП N

Образец (N)	Λ , нм (из уравнений (5) и (7))	$U(0)$, мэВ	A
32	34	3,6	11
13	34	3,4	3,5
6	66	–	4

Из таблицы следует, что для образцов с $N = 32$ и $N = 13$ было получено одно и то же значение длины нанопровода $\Lambda = 34$ нм как из уравнения (5), так и из уравнения (7). Полученные результаты свидетельствуют о взаимном влиянии как тепловых, так и квантовых флуктуаций в образцах с характерными размерами порядка сверхпроводящей длины когерентности. Это подтверждает одномерный характер соединений в сетке из нанопроводов. Эволюция от тепловых флуктуаций к квантовым при уменьшении количества СНП N однозначно указывает на одномерный характер сверхпроводимости в нанопроводах

и на то, что изолированный СНП, который может получиться в результате дальнейшего уменьшения ширины нанополоски W , будет однозначно подвержен только квантовым флуктуациям.

С другой стороны, при росте N , даже с сохранением квантового вклада в сверхпроводящий переход, происходит увеличение вклада тепловых флуктуаций, которые становятся доминирующими при большом количестве СНП, объединенных в сетку. Для каждого из СНП ширина w представляет собой некое усредненное значение, которое на длине образца, а также на его ширине может существенно варьироваться. Когда ширина полоски W , сформированной методом ЭЛЛ, растет, вероятность получить перколяционный путь с большими значениями ширины нанопровода w также увеличивается. А это, в свою очередь, приводит к подавлению квантового вклада в сопротивление и усилению роли тепловых флуктуаций.

Из результатов подгоночной процедуры следует, что полученные величины длины нанопроводов Λ хорошо коррелируют с данным сценарием. Действительно, как следует из таблицы, значение Λ равно 34 нм для образцов с большим количеством СНП, а для более узких полосок оно равно 66 нм. Снижение Λ с ростом числа СНП в полоске связано со снижением распределения их по w [Cir].

Аналогично значения A хорошо коррелируют с количеством нанопроводов N в полоске, что указывает на то, что вклад квантовых флуктуаций растет с уменьшением N . В заключение следует отметить, что полученные значения активационной энергии U хорошо согласуются с данными для сетки СНП из Nb на пористом кремнии, известными из литературы.

Заключение

Исследование транспортных свойств наносеток из СНП на основе Nb и NbN показало, что комбинирование технологии снизу-вверх (нанесение пленки сверхпроводника на пористую кремниевую подложку) с технологией сверху-вниз (ЭЛЛ высокого разрешения для формирования полосок с шириной менее 400 нм) позволяет формировать сверхпроводящую сетку из очень малого количества сверхпроводящих нанопроводов. Полученная система характеризуется подавлением сверхпроводимости при низких температурах вследствие флуктуаций сверхпроводящего параметра порядка. Установлено, что в общем случае флуктуации параметра порядка обуславливаются как термическим, так и квантовым вкладами. При этом со снижением количества нанопроводов в образце доминирующая роль принадлежит квантовым флуктуациям. Необходимо отметить, что аналогичные перспективные результаты были получены на пористых пленках из углеродных нанотрубок [21].

Исследованная система обладает существенным преимуществом перед одномерными сверхпроводниками, заключающимся в том, что сетка из небольшого количества СНП ($N < 10$), сформированных подобным самоорганизующимся методом с последующей ЭЛЛ высокого разрешения, обладает всеми свойствами одного одномерного СНП. Это весьма перспективно для сверхпроводниковой нанотехнологии.

Список литературы / References

1. Porous anodic Al_2O_3 layers for superconducting films / S.L. Prischepa [et al.] // Cryogenics. 1994. Vol. 34 ICEC Suppl. P. 851–853.
2. Vortex matching effects in Nb thin films due to Ni nanopillars embedded in anodic aluminum oxide substrates / A.I. Vorobjeva, E.A. Outkina, S.L. Prischepa [et al.] // Supercond. Sci. Technol. 2013. Vol. 26, No. 3. P. 035001(1–5).
3. Giordano N. Dissipation in a one-dimensional superconductor: Evidence for macroscopic quantum tunneling // Phys Rev B. 1990. Vol. 41, No. 10. P. 6350–6356.
4. Прищепа С.Л. Новые элементы сверхпроводниковой электроники и спинтроники // Докл. БГУИР. 2014. № 2 (80). С. 54–59.
5. Quantum interference device made by DNA templating of superconducting nanowires / D. Hopkins [et al.] // Science. 2005. Vol. 308, No. 5729. P.1762–1765.
6. Mooij J.E., Nazarov Y.V. Superconducting nanowires as quantum phase-slip junctions // Nature Phys. 2006. Vol. 2, No. 3. P. 169–172.

7. Mooij J.E., Harmans C.J.P.M. Phase-slip flux qubits // *New J. Phys.* 2005. Vol. 7. P. 219–224.
8. Hongisto T.T., Zorin A.B. Single-charge transistor based on the charge-phase duality of a superconducting nanowire circuit // *Phys. Rev. Lett.* 2012. Vol. 108, No. 9. P. 097001(1–5).
9. NbSi nanowire quantum phase-slip circuits: dc supercurrent blockage, microwave measurements and thermal analysis / C.H. Webster [et al.] // *Phys. Rev. B.* 2013. Vol. 87, No. 14. P. 144510(1–12).
10. Superconducting transition Nb nanowires fabricated using focused ion beam / G.C. Tettamanzi [et al.] // *Nanotechnology.* 2009. Vol. 20, No. 46. P. 465302.
11. Remeika M., Bezryadin A. Sub-10 nanometer fabrication: molecular templating, electron-beam sculpting and crystallization of metallic nanowires // *Nanotechnology.* 2005. Vol. 16, No. 8. P. 1172–1176.
12. Phase slippage driven dissipation and high-field Little-Parks effect in superconducting MoGe nanowire networks formed on nanoporous substrates / Q. Luo [et al.] // *Phys. Rev. B.* 2012. Vol. 85, No. 17. P. 174513(1–7).
13. Electrochemical deposition and characterization of Ni in mesoporous silicon / S.L. Prischepa [et al.] // *J. Electrochem Soc.* 2012. Vol. 159, No. 10. P. D623 – D627.
14. Quantum phase slips in superconducting Nb nanowire networks deposited on self-assembled Si templates / S.L. Prischepa [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* 2012. Vol. 101, No. 17. P. 172601(1–5).
15. Non-linear current-voltage characteristics due to quantum tunneling of phase slips in superconducting Nb nanowire networks / S.L. Prischepa [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* 2013. Vol. 103, No. 25. P. 252601(1–4).
16. Superconducting nanowire quantum interference device based on Nb ultrathin films deposited on self-assembled porous silicon templates / S.L. Prischepa [et al.] // *Nanotechnology.* 2014. Vol. 25, No. 42. P. 425205(1–9).
17. Attanasio C., Prischepa S.L. Porous silicon templates for superconducting devices // *Handbook of porous silicon.* Ed. L. Canham. Springer International Publishing AG. 2017. P. 1133–1147.
18. Synthesis and properties of Ni nanowires in porous silicon templates / S.L. Prischepa [et al.] // In: *Nanowires: synthesis, electrical properties and uses in biological systems.* Ed. L.J. Wilson. Nova Sci. Publisher. New York. 2014. P. 89–128.
19. Change of the topology of a superconducting thin film electromagnetically coupled with an array of ferromagnetic nanowires / S.L. Prischepa [et al.] // *Supercond. Sci. Technol.* 2016. Vol. 29, No. 1. P. 015011(1–9).
20. NbN superconducting nanonetwork fabricated using porous silicon templates and high-resolution electron beam lithography / S.L. Prischepa [et al.] // *Nanotechnology.* 2017. Vol. 28, No. 46. P. 465301(1–6).
21. Transport properties in aggregates of Nb nanowires templated by carbon nanotube films / S.L. Prischepa [et al.] // *Carbon.* 2016. Vol. 105. P. 544–550.

Сведения об авторе

Прищепа С.Л., д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the author

Prischepa S.L., D.Sci, professor, professor of information security department of Belarussian state university of informatics and radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-23-17;
e-mail: prischepa@bsuir.by
Прищепа Сергей Леонидович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6
Belarusian state university
of informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-23-17;
e-mail: prischepa@bsuir.by
Prischepa Serghej Leonidovich

УДК 621.396.218:614.89.086.5

ОЦЕНКА УРОВНЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ФОНА, СОЗДАВАЕМОГО БЕСПРОВОДНЫМИ СИСТЕМАМИ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ НАСЕЛЕНИЯ, НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗА ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ТРАФИКА

В.И. МОРДАЧЕВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 25 января 2019

Аннотация. Предложена методика оценки уровня электромагнитного фона, создаваемого беспроводными системами информационного обслуживания населения, на основе прогноза суммарной территориальной плотности трафика, определяющей уровень электромагнитной нагрузки на территорию в месте наблюдения, с учетом качества обеспечения внутрисетевой электромагнитной совместимости, спектральной эффективности радиоканалов этих систем и степени развитости их инфраструктуры.

Ключевые слова: мобильная связь, электромагнитный фон, плотность мобильного трафика, электромагнитная безопасность, внутрисетевая электромагнитная совместимость.

Abstract. A technique for estimating the level of the electromagnetic background created by wireless information services for the population is proposed. This technique is based on the forecast of the total traffic terrestrial density created by these systems, which is connected with the level of electromagnetic loading on territory in observation point vicinity; the quality of intranetwork electromagnetic compatibility, the radiochannels spectral efficiency and degree of development of their infrastructure are also taken into account.

Keywords: mobile communications, electromagnetic background, mobile traffic density, electromagnetic safety, intranetwork electromagnetic compatibility.

Doklady BGUIR. 2019, Vol. 120, No. 2, pp. 39-49
Estimation of intensity of electromagnetic background,
created by wireless systems of public information services,
on the base of forecast of traffic terrestrial density
V.I. Mordachev

Введение

Электромагнитное излучение (ЭМИ) является источником опасности для человеческого здоровья [1]. Решением ВОЗ [2] радиочастотные электромагнитные поля (ЭМП) классифицированы в качестве потенциального канцерогенного фактора. Анализ [3] результатов многочисленных измерений электромагнитного фона (ЭМФ), создаваемого источниками ЭМИ различных радиослужб (вещания, подвижной и фиксированной связи, радиолокационной и др.), проведенных в 2000–2011 гг., позволяет сделать выводы о том, что интенсивность ЭМФ в местах с высокой плотностью населения, где проводились измерения, достигала 2–3 мкВт/см² и формировалась в основном за счет ЭМИ базовых станций (БС) телефонной сотовой связи (СС), поскольку в указанный период основным видом услуг СС стандарта GSM и других стандартов СС второго поколения (2G) являлись услуги мобильной телефонной связи.

Вынужденные экологические риски населения от воздействия ЭМИ ограничены действующими гигиеническими нормативами, устанавливающими предельно допустимый уровень (ПДУ) суммарной интенсивности ЭМП, создаваемых системами СС и беспроводного доступа для населения. В странах ЕАЭС ПДУ ЭМП составляет 10 мкВт/см^2 , в других странах и регионах принятые нормативы для населения имеют различный статус и принимают значения в интервале $2\text{--}100 \text{ мкВт/см}^2$.

Наблюдаемое в настоящее время чрезвычайно интенсивное развитие систем СС, особенно в части увеличения доли услуг интерактивного вещания и передачи данных, реализации концепций «Интернет вещей», «Умный дом» и т. п., все возрастающего использования беспроводных технологических решений в здравоохранении, образовании, промышленности, на транспорте, в коммунальном хозяйстве и в других сферах человеческой деятельности может быть причиной катастрофического ухудшения электромагнитной экологии среды обитания и недопустимого снижения электромагнитной безопасности населения. Оно сопровождается как значительным увеличением ширины полосы частот радиоканалов – до $10\text{--}40 \text{ МГц}$ (системы 4G/LTE) и до $20\text{--}160 \text{ МГц}$ (системы 5G) при их интеграции с сетями WLAN, так и чрезвычайно значительным увеличением скоростей передачи данных по радиоканалам (до 100 мбит/с при передаче данных через пользовательский интерфейс и до $5\text{--}10 \text{ Гбит/с}$ в прямых радиоканалах БС) и пространственной плотности радиоэлектронных средств (РЭС) – источников ЭМИ (до 10^6 абонентских станций (АС) на 1 км^2), а также территориальной плотности мобильного трафика до 10 Мбит/с/м^2 (Rec. ITU-R M.2083, Report ITU-R M.2135), что при традиционных методах планирования и реализации радиосетей СС способно привести к увеличению интенсивности ЭМФ в местах с высокой плотностью населения на 2 порядка и более, т. е. до значений, на порядок и более превышающих принятые гигиенические нормативы.

В связи с изложенным чрезвычайную актуальность приобретает разработка методик практической оценки интенсивности ЭМФ, основанных на использовании доступных исходных данных и обладающих высокой предсказательной способностью по отношению к уровню электромагнитного загрязнения среды обитания и эффективности различных мер снижения интенсивности ЭМФ в местах с высокой плотностью населения в условиях его массового охвата услугами современных и перспективных систем СС.

В работах [4–10] предложена практическая методика оценки уровня ЭМФ, создаваемого системами СС, которая основана на использовании установленной автором однозначной аналитической зависимости средней интенсивности ЭМФ у земной поверхности от средней электромагнитной нагрузки на территорию (ЭМНТ), создаваемой базовым или абонентским радиооборудованием СС (совокупной изотропно излучаемой мощности (ЭИИМ) на единицу площади территории), при практической независимости интенсивности ЭМФ у земной поверхности от высоты подвеса антенн БС, если эта высота существенно превышает высоту точки наблюдения (ТН) над поверхностью. При этом главное слагаемое ЭМНТ – средняя ЭМНТ, создаваемая БС, рассматривается как некая константа, определяемая на основе регистрационных данных об ЭМИ БС, позволяющих определить территориальную плотность БС и их ЭИИМ в анализируемом территориальном фрагменте радиосети. Такой подход может быть признан адекватным при анализе сетей GSM, обладающих ограниченными возможностями адаптации ЭИИМ БС к нагрузке СС в различные периоды, но оказывается менее полезным при анализе сетей 3G/4G/5G, поскольку ряд особенностей этих сетей (регулировка ЭИИМ в прямых и обратных радиоканалах в широком диапазоне, реализация иерархической структуры радиосети СС, использование искусственного интеллекта и т. п.) обеспечивают возможности существенного снижения ЭИИМ БС и создаваемой ими ЭМНТ в ситуациях, когда:

- интенсивность трафика (в том числе в периоды максимальной нагрузки) в сети оказывается меньше ее предельно допустимого уровня;

- по мере развития сети размеры сайтов уменьшаются, что приводит к снижению мощности излучения в радиоканалах по сравнению с потенциально возможными, указываемыми в регистрационных документах;

– наблюдается постоянное увеличение объема и доли услуг передачи данных (по некоторым данным, объем трафика передачи данных по прямым каналам в этих сетях может превышать объем речевого трафика на 2 порядка и более).

Все вышеперечисленное обуславливает снижение объективности оценок интенсивности ЭМФ, создаваемого системами СС поколений 3G/4G/5G, на основе использования регистрационных данных об ЭИИМ БС и данных о территориальной плотности и интенсивности использования сотовых телефонов.

Цель данной работы – обоснование возможности использования методики [4–10] при оценках интенсивности ЭМФ, создаваемого системами СС, на основе прогноза интенсивности и средней территориальной плотности мобильного трафика информационного обслуживания населения по радиоканалам СС, а также использования данных о размерах зон обслуживания БС СС, позволяющих оценить влияние на ЭМНТ, создаваемую совокупностью БС, степени развития инфраструктуры СС и степени приближения радиопередатчиков (БС) к радиоприемникам (АС) с соответствующим уменьшением потерь при распространении радиоволн (РРВ) от БС к АС и снижением необходимой ЭИИМ в радиоканалах БС.

Территориальная плотность трафика (ТПТ), или пропускная способность сети СС по географическому признаку, является важнейшим и широко распространенным объективным интегральным системным параметром беспроводных систем информационного обслуживания населения (Rec. ITU-R M.2083), поэтому его прямое использование для прогноза интенсивности ЭМФ вместо большого объема данных ограниченной доступности и достоверности об ЭИИМ БС способно существенно расширить возможности анализа интенсивности ЭМФ, создаваемого системами СС, и существенно облегчить практический анализ электромагнитной экологии территорий и электромагнитной безопасности населения при различных вариантах реализации радиосетей СС, а также существенно расширить возможности анализа межсистемной электромагнитной совместимости (ЭМС) радиослужб, использующих выделенные полосы радиочастот на первичной и вторичной основе, и так называемых систем когнитивного радио.

Базовые модели и соотношения [4–12]

В соответствии с теоремой Шеннона – Хартли потенциальная пропускная способность C_p [бит/с] канала (теоретическая верхняя граница скорости передачи данных по аналоговому каналу связи с аддитивным гауссовским шумом мощности N) равна

$$C_p = \Delta F \cdot \log_2(1 + SNR), \quad SNR = S/N, \quad (1)$$

где ΔF – полоса пропускания канала, Гц; S – мощность сигнала в полосе ΔF , Вт; N – мощность шума в полосе ΔF , Вт; SNR – отношение «сигнал/шум» (signal-to-noise ratio) в канале связи.

Для радиоканалов современных систем мобильной (сотовой) связи 2G/3G/4G/5G и беспроводного широкополосного доступа Wi-Fi, WiMAX характерно следующее.

1. Спектральная плотность мощности собственного шума приемника может считаться постоянной $N_0 \approx N/\Delta F_R$ [Вт/Гц]:

$$N_0 = kT_0 K_N, \quad (2)$$

где k – постоянная Больцмана, $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; K_N – коэффициент шума радиоприемника, ед.; T_0 – температура окружающей среды, град ($T_0 = 290$ К).

2. Спектр радиосигнала мощностью S_R близок к прямоугольному, его ширина соответствует ширине ΔF_R полосы пропускания радиоканала, а его спектральная плотность мощности $S_0 \approx S_R/\Delta F_R$ [Вт/Гц] в полосе ΔF_R в первом приближении может считаться постоянной.

3. Спектральная плотность мощности внутрисетевых помех N_{INT} , создаваемых в радиоканалах СС сигналами других БС либо АС, использующих те же рабочие частоты, также может быть принята постоянной.

4. Различием между шириной ΔF_N шумовой полосы частот канала и шириной его стандартной полосы частот ΔF_R можно пренебречь: $\Delta F_N \approx \Delta F_R$.

5. Выражение для потенциальной пропускной способности радиоканала может быть приведено к следующему виду:

$$C_{PR} \approx \Delta F_R \cdot \log_2(1 + CNIR), \quad CNIR = S_0 / (N_0 + N_{INT}), \quad S_{EP} = C_{PR} / \Delta F_R \approx \log_2(1 + CNIR), \quad (3)$$

где S_{EP} [бит/с/Гц] – потенциальная спектральная эффективность передачи информации в радиоканале, $CNIR$ – отношение «сигнал/(шум+внутрисистемная помеха)» («carrier-to-noise plus intrasystem interference» ratio).

6. Реальная скорость C_{RR} передачи информации в канале связи в m раз меньше потенциальной пропускной способности канала C_{PR} ; во столько же раз реальная спектральная эффективность S_{ER} передачи информации в канале меньше потенциальной:

$$C_{PR} = mC_{RR}, \quad S_{ER} = S_{EP} / m. \quad (4)$$

7. Множитель m в (4) отражает как соотношение потенциальной и реально достижимой спектральной эффективности радиоканала, так и вклад технологии ММО в повышение спектральной эффективности передачи информации по радиоканалу. В радиоканалах СС без использования технологии ММО $m \approx 2...10$. Таким образом, планируемое увеличение спектральной эффективности в радиоканалах LTE за счет технологии ММО в 2–8 раз фактически позволяет лишь скомпенсировать неидеальность процессов модуляции/демодуляции и кодирования/декодирования. Поэтому дальнейший анализ будет выполнен для $m = 1$ в предположении, что скорость передачи данных C в радиоканалах СС близка к потенциальной в определении (1): $C \approx C_{PR}$.

8. Минимальная мощность полезного сигнала P_{DSIN} в радиоканале (реальная чувствительность радиоприема), при которой обеспечивается пропускная способность C_{PR} радиоканала с тепловым шумом мощностью N и внутрисетевой помехой мощностью $P_{INT} = N \cdot K_{CC}$ (пренебрегая различиями влияния внутрисетевой помехи и теплового шума на пропускную способность радиоканала), определяется соотношением

$$P_{DSIN} = N_{\Sigma} \Delta F_R (2^{S_{EP}} - 1), \quad N_{\Sigma} = (K_{CC} + 1) k T_0 K_N, \quad S_0 / N_{\Sigma} = CNIR, \quad (5)$$

где коэффициент $K_{CC} \approx N_{INT} / N_0$ характеризует создаваемое превышение уровнем внутрисетевой помехи уровня теплового шума; его величина определяется качеством частотно-пространственного планирования (ЧПП) радиосети и может принимать значения в широких пределах от 0 (внутрисетевая помеха отсутствует) до 100...1000 и даже более (при низком качестве ЧПП; при функционировании СС с завышенными уровнями полезного сигнала, что при кластерной пространственной топологии СС является причиной завышенных уровней внутрисетевой помехи).

Электромагнитная нагрузка на территорию, создаваемая излучением базовых станций

При мощности полезного сигнала P_{DSIN} на входе радиоприемника минимально необходимая энергия сигнала для приема информации со скоростью C_{PR} [бит/с] в течение времени t равна $E_{DSIN}(t) = P_{DSIN} \cdot t$, и энергия, приходящаяся на 1 бит принятой информации объемом $C_{\Sigma}(t) = t \cdot C_{PR}$, должна быть не ниже следующего значения:

$$E_b = \frac{E_{DSIN}(t)}{C_{\Sigma}(t)} = \frac{\Delta F_R N_{\Sigma} (2^{S_{EP}} - 1)}{S_{EP} \Delta F_R} = \frac{(K_{CC} + 1) k T_0 K_N (2^{S_{EP}} - 1)}{S_{EP}}. \quad (6)$$

Для того, чтобы сигнал на входе приемника имел энергетику (6) и в СС обеспечивался хендовер – процесс передачи обслуживания абонента во время вызова или сессии передачи данных от одной БС к другой без нарушения и потери обслуживания при пересечении АС границы сайтов, необходимо следующее:

– радиосигналы должны излучаться передатчиками БС с энергией, компенсирующей базовые потери L_b при распространении радиоволн (РРВ) от антенны передатчика БС к антенне приемника АС (Rec.ITU-R P.341); применительно к рассматриваемому случаю ограничимся учетом потерь L_{bf} при РРВ в свободном пространстве (поскольку на густонаселенной

городской территории радиус микросайтов сотовой сети, как правило, меньше радиуса области свободного РРВ («breakpoint distance», Rec.ITU-R P.1411-8), определяемого с учетом отражения ЭМИ БС от земной поверхности и стен зданий) и учетом потерь на затухание радиоволн в зданиях при обслуживании АС внутри помещений. Величина усредненных потерь L_m на затухание радиоволн в зданиях зависит от диапазона частот, а также этажа, особенностей архитектуры, материала здания и других факторов и составляет в среднем 12–18 дБ (Report ITU-R 239, Report ITU-R 499 и др.). Потери на замирания L_C при РРВ в «каньонах» городской застройки связаны с многолучевостью и дифракцией; они зависят от высоты и плотности городской застройки, высоты подвеса антенн БС, высоты и характера пространственного размещения АС и т. п. и могут составлять 10–20 дБ. Но, принимая во внимание требования к качеству связи, в модели условий РРВ Rec.ITU-R P.1411-8 для этих условий корректирующий множитель на замирания принят равным 20 дБ;

– энергия сигналов на входе приемника АС должна превышать минимально необходимый уровень на некоторую величину K_H , обеспечивающую необходимый запас по уровню принимаемого сигнала АС для реализации хендвера;

– эквивалентная изотропно излучаемая энергия (ЭИИЭ) на бит передаваемой информации должна быть обеспечена на уровне не ниже $E_{bt} = E_b L_{bf} L_m L_C K_H$.

Затухание при РРВ в свободном пространстве определяется следующей формулой (Rec. ITU-R PN.525):

$$L_{bf} = \frac{E_{bt}}{E_b} = \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 [\text{единиц}]. \quad (7)$$

Отсюда

$$E_{bt}(R) = L_{bf} L_m K_H E_b = K_1 R^2, \quad K_1 = \frac{16\pi^2 k T_0 K_N L_m L_C K_H (2^{m_{SE}} - 1)(K_{CC} + 1)}{\lambda^2 S_{ER}}. \quad (8)$$

Плотность распределения вероятности расстояний между передатчиком (антенной БС) и приемником (АС) при случайном равномерном распределении АС по плоской земной поверхности имеет следующий вид [12]:

$$w(R) = \frac{2R}{R_{\max}^2 - H^2}, \quad H = H_{BS} - h \approx H_{BS} \ll R_{\max}; \quad H \leq R \leq R_{\max}, \quad (9)$$

где H_{BS} – высота подвеса антенны БС ($H_{BS} \geq 10$ м), h – высота АС над поверхностью (обычно принимается равной в пределах 1–2 м, т. е. с учетом расположения АС у тела человека в положении «стоя» или «сидя»); R_{\max} – радиус зоны обслуживания, на границе которой обслуживание АС с мощностью полезного сигнала не ниже (5) требует максимальной ЭИИЭ БС на бит передаваемой информации.

Поскольку расстояние между приемником и передатчиком в системах СС случайно, случайным оказывается и величина потерь при РРВ между БС и АС. И вследствие того, что в прямых каналах связи (БС-АС) третьего (3G) и последующих поколений имеет место адаптация по мощности ЭМИ БС, обеспечивающая номинальный (минимально необходимый) уровень сигнала на входе приемника АС, значения (8) также являются случайными. Используя (8), (9), определим распределение вероятности ЭИИЭ БС мобильной связи, приходящейся на 1 бит передаваемой информации:

$$w(E_{bt}) = w(R(E_{bt})) \left| \frac{dR(E_{bt})}{dE_{bt}} \right| = \frac{1}{E_{bt\max} - E_{bt\min}} \approx \frac{1}{E_{bt\max}}; \quad (10)$$

$$m_1(E_{bt}) \approx \frac{E_{bt\max}}{2} = \frac{8\pi^2 k T_0 K_N K_H L_m L_C (2^{m_{SE}} - 1)(K_{CC} + 1) R_{\max}^2}{\lambda^2 S_{ER}}. \quad (11)$$

Таким образом, плотность распределения вероятности ЭИИЭ на бит передаваемой информации имеет вид равномерного распределения с матожиданием, равным половине от максимального значения, соответствующего расположению принимающей АС на границе сайта.

При равномерном случайном распределении АС в активном состоянии по территории со средней плотностью ρ [АС/м²], если каждая АС принимает поток со скоростью V [бит/с], то средняя территориальная плотность трафика информационного обслуживания населения

по прямым каналам БС будет равна $S_{tr} = \rho V$ [бит/(с·м²)], и создаваемая БС СС средняя ЭМНТ B [Вт/м²] составит

$$B(R_{\max}, S_{tr}, K_{CC}, S_{EP}, \lambda) = m_1(E_{bt}) S_{tr} = \frac{8\pi^2 k T_0 K_N K_H L_m L_C (2^{m_{SE}} - 1) (K_{CC} + 1) R_{\max}^2 S_{tr} Q}{\lambda^2 S_{ER}}, \quad (12)$$

где $Q = P_{AR}/P_{AI} < 1$ – системный параметр направленности ЭМИ БС (направленности ЭМИ битов передаваемой информации), определяемый по аналогии с [13,14]; здесь P_{AR} и P_{AI} – значения мощности ЭМИ БС, достигающей области наблюдения вблизи земной поверхности, для случая реальной антенны БС с избирательностью по горизонтали и вертикали и для случая идеальной всенаправленной (изотропной) антенны БС с тем же коэффициентом усиления соответственно. Это соотношение получено при условии, что на входе радиоприемника АС присутствует сигнал минимально необходимого уровня, соответствующего необходимому значению $CNIR$, и структура радиосети регулярна с N_S секторами на каждой БС; $Q \approx 1/N_S$.

Подстановкой (12) в предложенную в [4, 6–10] формулу для пессимистической оценки (оценки наихудшего случая) средней суммарной интенсивности ЭМФ $Z_{\Sigma BS}$ [Вт/м²], создаваемого в ТН у земной поверхности на высоте $H_{OP} \ll H_{BS}$ всем множеством БС СС, расположенных случайно по отношению к ТН в ее окрестности, включающей как зону свободного РРВ между БС и ТН, так и область интерференционного РРВ между ними, получим следующее соотношение для оценки интенсивности ЭМФ, создаваемого БС сети сотовой связи, функционирующей в полосе частот, соответствующей длине волны λ :

$$Z_{BS} \approx \frac{B(R_{\max}, S_{tr}, K_{CC}, S_{EP}, \lambda)}{2} \ln \left(\frac{4H_{OP} \sqrt{e}}{\lambda} \right), \quad Z_{BS} = \sum_{i=1}^N |\Pi_{BSi}|. \quad (13)$$

Оценки (8), (11), (12), (13) существенно зависят от длины волны λ . Принимая во внимание относительную узость полос частот, выделенных для ЭМИ БС мобильной связи (отношение ширины выделенной полосы частот к значению ее левой границы составляет 2,7 % для GSM-900, 4,2 % для GSM-1800, 2,8 % для UMTS, менее 5 % для каждой из полос частот LTE [37]), эти оценки для каждой полосы частот можно выполнять для фиксированного значения λ , соответствующего ее середине. Поскольку для каждой полосы частот может быть характерен свой стандарт СС, а также свои значения K_{CC} , S_{EP} , S_{tr} , R_{\max} , суммарная интенсивность ЭМФ, создаваемого всеми J подмножествами БС СС, отличающимися используемой полосой частот, иерархическим уровнем в структуре радиосети СС и другой спецификой, может быть определена очевидным образом:

$$Z_{\Sigma BS} = \sum_{j=1}^J \frac{B_j(R_{\max j}, S_{tr j}, K_{CC j}, S_{EP j}, \lambda_j)}{2} \ln \left(\frac{4H_{OP} \sqrt{e}}{\lambda_j} \right), \quad (14)$$

где $Z_{\Sigma BS}$ – суммарная интенсивность ЭМФ [Вт/м²], создаваемого в ТН на высоте H_{OP} над земной поверхностью, определяемая как скалярная сумма значений плотности потока мощности Π_{BSi} ЭМП в ТН от всех БС в области их радиозаметности из ТН.

Оценки интенсивности ЭМФ, создаваемого ЭМИ БС

Для оценки практической применимости приведенных соотношений ниже выполнен сравнительный анализ результатов оценки суммарной интенсивности ЭМФ, создаваемого БС СС стандарта GSM-1800 в типовых условиях, на основе непосредственного применения подхода [4–10] и с использованием соотношений (8), (11)–(13).

Оценки средней территориальной плотности трафика при различной интенсивности беспроводного информационного обслуживания населения приведены в таблице.

При выполнении анализа приняты следующие типовые условия: диапазон частот телефонной СС 1,8 ГГц ($\lambda \approx 0,16$ м); территориальная плотность АС в активном состоянии $\rho = 5 \cdot 10^{-4}$ АС/м² ($M_{SS} = 500$ АС/км² при территориальной плотности всех АС 5000–6000 АС/км² и удельной интенсивности трафика в периоды наибольшей нагрузки 0,08–0,1 Эрл.), скорость передачи данных по каналу речевого трафика GSM $V = 2^{15}$ бит/с, один радиоканал GSM обеспечивает передачу 8 каналов речевого трафика; антенна АС ненаправленная

с коэффициентом усиления, близким к 1 (0 дБ); все БС регулярной одноуровневой радиосети GSM имеют трехсекторную структуру ($Q \approx 1/3$) с четырьмя радиоканалами в каждом секторе (30 каналов трафика и 2 канала управления) с суммарной ЭИИМ $P_{EBS} = 800$ Вт (59 дБм) при часто используемой канальной ЭИИМ 53 дБм (200 Вт).

Оценки средней территориальной плотности трафика по прямому каналу БС в различных условиях

Характеристика обслуживаемой территории и услуг связи перспективных СС	V , бит/с	ρ , АС/м ² (АС/км ²)	S_{tr} , бит/(с·м ²)
Речевой трафик GSM, высокая территориальная плотность потребителей услуг связи	$3,3 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^{-3}$ ($3 \cdot 10^3$)	$10^1 \dots 10^2$ (очень низкая)
Речевой трафик GSM, очень высокая территориальная плотность потребителей услуг связи	$3,3 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^{-2}$ ($3 \cdot 10^4$)	10^3 (низкая)
Совокупный мобильный трафик, высокая территориальная плотность потребителей услуг связи	$4 \cdot 10^6$	$2,5 \cdot 10^{-3}$ ($2,5 \cdot 10^3$)	10^4 (средняя)
Планируемый объем услуг в сетях 4G, высокая территориальная плотность потребителей ¹⁾	10^7	10^{-2} (10^4)	10^5 (высокая)
Планируемый объем услуг в сетях 5G, высокая территориальная плотность потребителей ¹⁾	10^7	10^{-1} (10^5)	10^6 (очень высокая)
Планируемый объем услуг в сетях 5G, очень высокая территориальная плотность потребителей ¹⁾	10^8	1 (10^6)	10^7 (чрезвычайно высокая)

¹⁾ Рес. ИТУ-R М.2083

Оценка интенсивности ЭМФ на основе подхода [4–10]

При принятой структуре БС (3 сектора, в каждом секторе 4 радиоканала, что обеспечивает 30 каналов трафика и 2 канала управления) общее число каналов трафика, реализуемых каждой БС, равно 90. Однако для обеспечения высокого качества связи (с вероятностью блокирования вызова не более 1 %) в каждом секторе БС в среднем должно одновременно обслуживаться не более 20 АС (в среднем не более $M_{SSS} = 60$ обслуживаемых АС в сайте БС) [15]. При излучении в каждом секторе БС 32 канальных слотов ЭМИ БС в периоды максимальной нагрузки осуществляется с избыточностью в ЭИИМ (в 1,6 раз). В результате:

– средняя территориальная плотность БС: $\rho_{BS} = M_{SS}/M_{SSS} \approx 8,3$ БС/км², площадь круга, покрывающего гексагональную зону обслуживания БС, равна примерно 0,12 км², и его радиус R_{max} , соответствующий максимальной дальности радиосвязи, составляет примерно 200 м;

– при суммарной ЭИИМ БС 800 Вт средняя ЭМНТ, создаваемая всем множеством БС СС на рассматриваемой местности, составляет $B_1 = \rho_{BS} P_{EBS} = 8,3 \cdot 0,8 \approx 6,7$ кВт/км² = 0,0067 Вт/м²;

– такая ЭМНТ, согласно (13), на высоте $H_{OP} = 2$ м над земной поверхностью создает ЭМФ со средней интенсивностью

$$Z_{BS1} \approx \frac{0,0067}{2} \ln \left(\frac{4 \cdot 2 \sqrt{e}}{0,16} \right) \approx 0,0148 \text{ Вт/м}^2.$$

Дополнительная информация для реализации сравнительного анализа

Для анализа интенсивности ЭМФ с использованием (8), (11)–(13) следует принять во внимание следующее:

– пороговая чувствительность радиоприема АС GSM-1800 составляет –105 дБм [16]. Это согласуется с оценками с использованием (5): при $K_N = 5$, $\Delta F = 200$ кГц, $T_0 = 290$ К получим $P_{DSIN} = k T_0 K_N \Delta F = 4 \cdot 10^{-15}$ Вт или –144 дБВт = –114 дБм; при пороговом значении $CNIR = 2^{m_{Ser}} - 1 = 8$ (или 9 дБ) пороговая чувствительность радиоприема будет равна $P_0 = P_{DSIN} + CNIR = -105$ дБм;

– в соответствии с (7) потери на РРВ в свободном пространстве на максимальное расстояние 200 м равны примерно 84 дБ, однако в связи со случайностью расстояния между БС и АС, принимая во внимание распределение вероятностей (9) и зависимость (7), можно найти плотность распределения вероятностей и матожидание потерь РРВ в свободном пространстве:

$$w(L_{bf}) = w(R(L_{bf})) \left| \frac{dR(L_{bf})}{dL_{bf}} \right| = \frac{1}{L_{bf \max} - L_{bf \min}} \approx \frac{1}{L_{bf \max}}; \quad (15)$$

$$m_1(L_{bf}) \approx \frac{L_{bf \max}}{2} = \frac{8\pi^2 R_{\max}^2}{\lambda^2}; \quad (16)$$

при $R_{\max} = 200$ м, $\lambda = 0,16$ м мы получим $m_1(L_{bf}) \approx 81$ дБ;

– при $P_0 = -105$ дБм минимально необходимая ЭИИМ одного радиоканала БС составляет в среднем $(-105 + 81) = -24$ дБм (4 мВт). При принятой ЭИИМ 53 дБм одного радиоканала GSM-1800 в рассматриваемом типовом случае получен запас на замирания, затухания в зданиях, хендовер и внутрисетевые помехи $K_T = K_H L_m L_C (K_{CC} + 1) = 77$ дБ.

Оценка интенсивности ЭМФ на основе анализа ТПТ

При скорости передачи данных от БС к АС $V = 2^{15}$ бит/с и средней территориальной плотности АС $\rho = 5 \cdot 10^{-4}$ АС/м² средняя ТПТ будет равна $S_{tr} = \rho V \approx 16,4$ бит/с/м².

Производя расчет с использованием (6) для $K_{CC} = 0$ (внутрисетевая помеха отсутствует), $S_{ER} = 1,31$, $m = 2,42$ [11, 17] (при $CNIR = 9$ дБ в соответствии с (3) $S_{EP} = 3,17$), мы получим пороговый уровень энергии на бит принимаемой АС информации:

$$E_b = \frac{(K_{CC} + 1) k T_0 K_N (2^{m S_{ER}} - 1)}{S_{ER}} \approx 1,22 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

Проверка: при скорости передачи информации в радиоканале $C = 2^{18}$ бит/с реальная чувствительность радиоприема АС будет равна $P_{DSIN} = C \cdot E_b = 3,2 \cdot 10^{-14}$ Вт, или $-104,9$ дБм, что совпадает с [16].

Оценивая с использованием (12) среднюю ЭМНТ B_{II} , создаваемую БС, при $S_{tr} \approx 16,4$ бит/с/м², $Q = 1/3$ и $E_b \approx 1,22 \cdot 10^{-19}$ Дж, а также при том же значении резерва $K_T = 5 \cdot 10^7$ на замирания, затухания в зданиях, хендовер и внутрисетевые помехи, мы получаем $B \approx 0,0041$. Введение той же избыточности ЭИИМ БС в 1,6 раз, необходимой для обеспечения высокого качества связи с вероятностью блокирования вызовов $\leq 1\%$, получим $B_{II} = 1,6B \approx 0,0066$. Такая ЭМНТ в соответствии с (13) на той же высоте $H_{OP} = 2$ м над земной поверхностью создает ЭМФ со средней интенсивностью

$$Z_{BSII} \approx \frac{0,0041}{2} \ln \left(\frac{4 \cdot 2\sqrt{e}}{0,16} \right) \approx 0,0146 \text{ Вт/м}^2.$$

Таким образом, полученная оценка Z_{BSII} практически совпадает с оценкой Z_{BSI} интенсивности ЭМФ на основе подхода [4–10].

Влияние внутрисистемной ЭМС на интенсивность ЭМФ

В рассмотренном выше типовом примере оценки интенсивности ЭМФ, создаваемого БС с ЭИИМ 53 дБм, выявлен резерв в ЭИИМ БС $K_T = K_H L_m L_C (K_{CC} + 1) = 77$ дБ. Неустраняемая часть $K_H L_m L_C$ этого резерва, необходимая для обеспечения хендовера, компенсации замираний и потерь при РРВ внутрь зданий, составляет 30–50 дБ. Таким образом, при ЭИИМ БС 47–57 дБм, обычно используемой в городских сетях GSM, оставшаяся часть резерва ($K_{CC} + 1$) составляет не менее 20–30 дБ. В соотношениях (5)–(14) коэффициент K_{CC} представляет собой отношение уровней внутрисетевой помехи и собственного теплового шума при радиоприеме АС и характеризует качество обеспечения внутрисистемной (внутрисетевой) ЭМС; при низком уровне внутрисетевой ЭМС $K_{CC} \gg 10$.

Ниже на рис. 1–4 приведены результаты анализа интенсивности ЭМФ (13), создаваемого БС у земной поверхности при различных относительных уровнях внутрисетевых помех в каналах СС, выполненного для следующих условий, принятых в качестве типовых: территориальная плотность АС в активном состоянии $\rho = 10^3 \dots 3 \cdot 10^4$ АС/км² ($10^{-3} \dots 3 \cdot 10^{-2}$ АС/м²), полоса частот СС в области 2 ГГц ($\lambda = 0,15$ м); умеренный резерв $K_H L_m L_C = 30$ дБ в ЭИИМ БС на реализацию хендовера, компенсацию замираний и потерь при РРВ внутрь зданий; трехсекторная структура регулярной радиосети СС ($N_S = 3$, $Q = 1/3$), $K_N = 5$, $T_0 = 290$ К.

На рис. 1 для средней ТПТ $S_{tr} = 3 \cdot 10^4$ бит/с/м² и $Q = 1/3$ приведены расчетные зависимости $Z_{BS}(R_{\max})$ средней интенсивности ЭМФ, создаваемого БС, от максимальной

дальности связи (радиуса окружности, описывающей зону обслуживания БС). Расчетные зависимости $Z_{BS}(QS_{tr})$ средней условной интенсивности ЭМФ от ТПТ, полученные для максимальной дальности связи 300 и 100 м, приведены на рис. 2 и 3 соответственно.

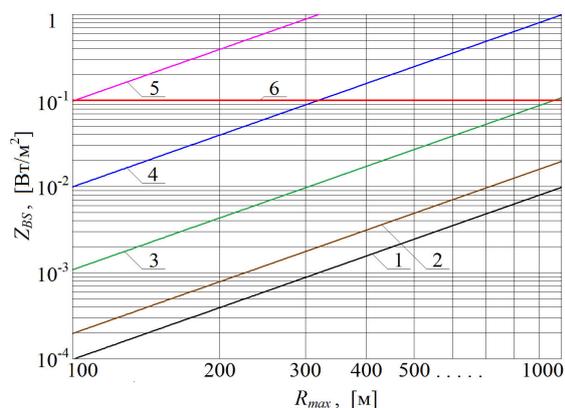


Рис. 1. Зависимости $Z_{BS}(R_{max})$, полученные для $S_{tr}=3 \cdot 10^4$ бит/(с·м²) и различных K_{CC} при $Q = 1/3$, $S_{EP}=5$, $K_N=5$, $T_0=290$ К, $\lambda = 0,15$ м, $K_H L_m L_C=1000$

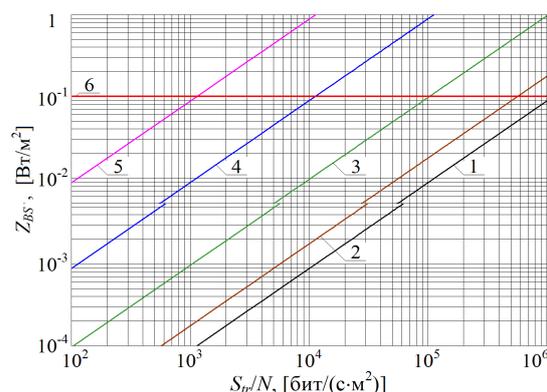


Рис. 2. Зависимости $Z_{BS}(QS_{tr})$, полученные для $R_{max} = 300$ м и различных K_{CC} при $Q = 1/3$, $S_{EP}=5$, $K_N=5$, $T_0=290$ К, $\lambda = 0,15$ м, $K_H L_m L_C=1000$

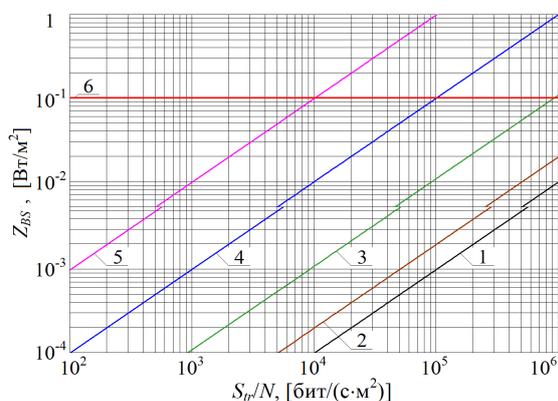


Рис. 3. Зависимости $Z_{BS}(QS_{tr})$, полученные для $R_{max} = 100$ м и различных K_{CC} при $Q = 1/3$, $S_{EP}=5$, $K_N=5$, $T_0=290$ К, $\lambda = 0,15$ м, $K_H L_m L_C=1000$

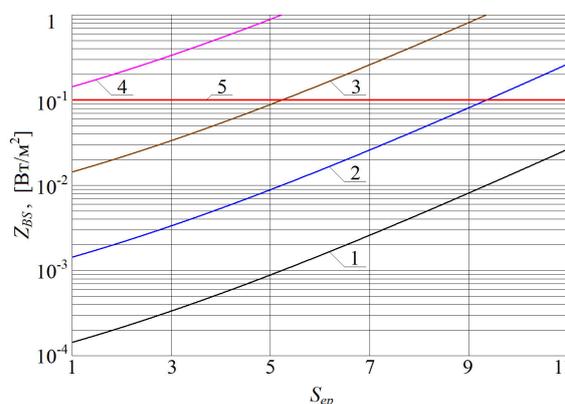


Рис. 4. Зависимости $Z_{BS}(S_{EP})$, полученные для $R_{max} = 300$ м, $\lambda = 0,15$ м и различных значений QS_{tr} при $K_N=5$, $T_0=290$ К, $K_{CC} = 100$, $K_H L_m L_C=1000$

Данные зависимости рассчитаны для различных значений K_{CC} при $S_{EP} = 5$. Графики № 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют значениям $K_{CC} = 0, 1, 10, 10^2, 10^3$ соответственно; горизонтальная линия № 6 $Z_{BS}(R_{max}) = 0,1$ Вт/м² и $Z_{BS}(QS_{tr}) = 0,1$ Вт/м² соответствует принятому ПДУ ЭМФ. Сравнение этих зависимостей для различных K_{CC} позволяет сделать вывод о чрезвычайно существенном влиянии качества частотно-пространственного планирования и обеспечения внутрисетевой ЭМС СС новых поколений на их безопасность для населения. В частности:

- при $S_{tr} = 3 \cdot 10^4$ бит/с·м², $Q = 1/3$ и высоких уровнях внутрисетевых помех ($K_{CC} \geq 10^2$) безопасность СС для населения даже при умеренном необходимом запасе в ЭИИМ БС $K_H L_m L_C = 30$ дБ обеспечивается только при использовании микро-сайтов с территориальной плотностью БС порядка 15–20 БС/км² и более;

- при малой ТПТ обеспечение электромагнитной безопасности населения не представляет сложностей, однако при ожидаемом быстром росте интенсивности этого трафика обеспечение безопасности населения потребует существенного снижения внутрисетевых помех, в том числе за счет существенного расширения объема радиочастотного спектра, выделяемого СС новых поколений.

Данные выводы подтверждаются и анализом расчетных зависимостей средней интенсивности ЭМФ, создаваемого БС, от потенциальной спектральной эффективности (рис. 4) для различных уровней средней плотности трафика (кривые 1, 2, 3, 4 получены для значений $QS_{tr} = 10^2, 10^3, 10^4$ и 10^5 бит/с·м² соответственно, горизонтальная линия 5 соответствует ПДУ

ЭМФ). Прямое увеличение потенциальной спектральной эффективности радиоканалов СС, достигаемое за счет увеличения $CNIR$ и соответствующего роста канальной ЭИИМ БС, также влечет рост уровня внутрисетевых помех и, как следствие, увеличение уровней ЭМФ у земной поверхности. Однако применение технологии ММО и адаптивных антенн БС в перспективе способно изменить эту зависимость на противоположную.

Из (11)–(14) следует, что с уменьшением длины волны требования к снижению относительного уровня внутрисетевых помех и к качеству внутрисистемной ЭМС ужесточаются, однако их выполнение не должно вызывать принципиальных трудностей в связи с увеличением направленности и адаптивности ЭМИ БС 4G/5G и степени экранирования ЭМИ БС элементами городской застройки, рельефа земной поверхности и растительности, а также в связи с существенным расширением объема радиочастотного спектра, выделяемого СС новых поколений.

Заключение

Полученные соотношения (12)–(14) обеспечивают возможность использования разработанной автором методики [4–10] оценки интенсивности ЭМФ, создаваемого радиосетями СС на обслуживаемой территории, непосредственно на основе прогноза средней территориальной плотности беспроводного трафика информационного обслуживания населения в периоды наибольшей нагрузки и данных о размерах сайтов в рассматриваемом фрагменте радиосети СС, не прибегая к сложному и трудоемкому анализу радиоэлектронной обстановки и оценке ЭМНТ, создаваемой всей совокупностью БС беспроводных систем информационного обслуживания населения – сотовой (мобильной) связи, беспроводного широкополосного доступа и др.

Поскольку оценки интенсивности ЭМФ по данной методике хорошо согласуются с известными экспериментальными данными [3], следует ожидать и хорошего соответствия оценок интенсивности ЭМФ на основе прогноза ТПТ результатам физических измерений интенсивности ЭМФ в местах с высокой плотностью населения; тем не менее экспериментальная проверка предложенной методики представляет безусловный интерес.

Выражения (12)–(14) позволяют количественно оценить эффективность различных путей снижения интенсивности ЭМФ за счет уменьшения избыточности в ЭИИМ БС $K_T = K_H L_m L_C (K_{CC} + 1)$ для обеспечения хендвера, компенсации замираний и потерь при РРВ внутрь зданий, компенсации неидеальности внутрисетевой ЭМС, а также за счет повышения избирательности ЭМИ БС уменьшением значения системного параметра Q направленности ЭМИ БС.

Предложенная методика оценки ожидаемой интенсивности ЭМФ на основе прогноза ТПТ существенно облегчает как процедуры анализа электромагнитной экологии густонаселенных территорий и электромагнитной безопасности населения в условиях чрезвычайно интенсивного развития беспроводных технологий и СС новых поколений, так и процедуры анализа ЭМС радиосистем радиослужб, использующих радиочастотный спектр на первичной и вторичной основе.

Список литературы / References

1. Apolonski S.M., Koliada T.D., Sindalovski B.E. Safety of vital activity in electromagnetic fields. Spb: Polytechnika, 2006. 263 p. (in Russ.)
2. IARC classifies radiofrequency electromagnetic fields as possibly carcinogenic to humans // WHO, Press Release. 2011. No. 208.
3. Mordachev V.I. Verification of the worst case model for the estimation of average intensity of the electromagnetic background created by base stations of cellular communications // Doklady BGUIR. 2018. No. 1. P. 12–18 (in Russ.)
4. Mordachev V.I. Terrestrial electromagnetic loading created by electromagnetic radiations of cellular base stations // Doklady BGUIR. 2012. № 6. P. 116–123. (in Russ.)
5. Mordachev V.I. Electromagnetic filling on the territory, created by user's stations of cellular communications // Doklady BGUIR. 2012. No.7. P. 25–33. (in Russ.)
6. Mordachev V.I. Terrestrial electromagnetic filling in nonhomogeneous radio-electronic environment // Doklady BGUIR. 2012. No.8. P. 23–31. (in Russ.)

7. Mordachev V. Worst-Case Models of Electromagnetic Background Created by Cellular Base Stations // Proc. of the 9th Intern. Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC 2013). Cagliari, Sardinia, Italy, July 1–5, 2013. P. 590–595.
8. Mordachev V. Worst-Case Estimation of Electromagnetic Background Near Ground Surface Created by Heterogeneous Radioelectronic Environment // Proc. of the EMC 2015 Joint IEEE Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility and EMC EUROPE. Dresden, Germany, August 16–22, 2015. P. 1147–1152.
9. Mordachev V.I. Electromagnetic background created by base and mobile radio stations of cellular communications // Doklady BGUIR. 2016. No.1. P. 38–44. (in Russ.)
10. Mordachev V. Electromagnetic Background Created by Base and Mobile Radio Equipment of Cellular Communications // Proc. of the 2016 Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility «EMC Europe 2016». Wroclaw, Poland, September 5–9, 2016. P. 590–595.
11. Mordachev V.I. Electromagnetic safety of broadband systems of mobile communications of new generations // Doklady BGUIR. 2018. No. 3. P. 39–46.
12. Mordachev V. System ecology of cellular communications. Minsk: Belarus State University Publishers, 2009. 319 p. (in Russ.)
13. Loyka S.L., Mordachev V.I. Generalized System Characteristic of Antenna Selectivity // Proc. of International Conference on Electromagnetic Compatibility (ICEMC'95 KUL). Kuala Lumpur, Malaysia, 1995. P. 41–45.
14. Mordachev V.I. Generalized EMC characteristics of radio equipment // Proc. of the Intern. conference on metrology and measurement «ICMM 2007». Vol. 2. Beijing, September 5–7, 2007. P. 57–66.
15. Mehrotra A. Cellular radio: analog and digital systems. Artech House, 1994. 423 p.
16. ETSI EN 300 910, V8.5.1 (2001-11). Digital Cellular Telecommunications System (Phase 2+). Radio Transmission and Reception (GSM 05.05 version 8.5.1 Release 1999).
17. Mordachev V. Restrictions on Wideband Systems of Mobile Communications of New Generations at Declared Expansion of Data Transfer Rates // Proc. of the 2018 Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility «EMC Europe 2018». Amsterdam, August 27–30, 2018. P. 202–207.

Сведения об авторе

Мордачев В.И., к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the author

Mordachev V.I., PhD, associate professor, leading researcher of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-89-94;
e-mail: mordachev@bsuir.by;
www.emc.bsuir.by
Мордачев Владимир Иванович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6
Belarusian state university
of informatics and radioelectronics
phone. +375-17-293-89-94;
e-mail: mordachev@bsuir.by;
www.emc.bsuir.by
Mordachev Vladimir Ivanovich

УДК 004.056.5

ФИЗИЧЕСКАЯ КРИПТОГРАФИЯ И ЗАЩИТА ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ

А.А. ИВАНЮК, С.С. ЗАЛИВАКО

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 11 февраля 2019

Аннотация. В статье представлены основные научные результаты и достижения, полученные аспирантами, магистрантами и соискателями кафедры информатики БГУИР под научным руководством профессора А.А. Иванюка в период с 2014 по 2018 год. Приведены оригинальные схемотехнические решения в области синтеза цифровых физически неклонированных функций. Впервые проблематика физически неклонированных функций была опубликована в 2011 году в журнале «Информатика» профессором кафедры ПОИТ БГУИР д.т.н., профессором В.Н. Ярмоликом, являющимся известным отечественным ученым в области проектирования надежных цифровых устройств и систем. В данной статье приведены новые методы и алгоритмы неклонированной идентификации и аутентификации цифровых устройств. Представлены результаты, полученные в области генерирования случайных числовых последовательностей. Кроме того, приведены результаты по методам реализации аппаратных водяных знаков и функциональной обфускации цифровых устройств.

Ключевые слова: физически неклонированные функции, цифровые устройства, программируемые логические интегральные схемы, идентификация, аутентификация, случайные числовые последовательности, аппаратные водяные знаки, функциональная обфускация.

Abstract. The article presents the main scientific results and practical achievements obtained by undergraduate and graduate students of Computer Science department of BSUIR under the supervision of professor A.A. Ivaniuk during the period from 2014 to 2018. The original circuit solutions in the field of synthesis of digital physically unclonable functions are presented. The area of physically unclonable functions was first time published in the journal «Informatics» by professor of Software for information technologies department of BSUIR, doctor of technical sciences V.N. Yarmolik, which is a famous domestic scientist in area of reliable digital devices and systems design. New methods and algorithms for unclonable identification and authentication of digital devices are described. The paper also presents the results obtained in the field of random number sequences generation. In addition, the results on the methods of hardware watermarks injection and functional obfuscation of digital devices are given.

Keywords: physically unclonable functions, digital devices, field programmable gate arrays, identification, authentication, random number sequences, hardware watermarks, functional obfuscation.

Doklady BGUIR. 2019, Vol. 120, No. 2, pp. 50-58
Physical cryptography and security of digital devices
A.A. Ivaniuk, S.S. Zalivaka

Введение

Количество устройств Интернета вещей (IoT), соединенных между собой, к 2020 году достигнет порядка 50 млрд. В то же время, количество криптографических атак на данный класс устройств также возрастает. В связи с этим актуальной научной и практической задачей является разработка аппаратных методов и средств защиты цифровых устройств от нелегального доступа, копирования, модификации и обратного проектирования. В настоящее время данный класс задач может быть эффективно решен с помощью методов физической криптографии. В статье кратко приводятся основные научные и технические

результаты, полученные в области исследования физически неклонированных функций (ФНФ) для решения задач генерирования случайных числовых последовательностей, идентификации и аутентификации. Поскольку реализации ФНФ являются компактными и высокопроизводительными, они подходят для решения задач аппаратной безопасности устройств IoT. Помимо этого, приводятся результаты по внедрению аппаратных цифровых водяных знаков и функциональной обфускации, которые также актуальны для защиты цифровых устройств и их проектных описаний.

Генерирование случайных числовых последовательностей

Особенностью ФНФ, реализованных на кристалле интегральной схемы, является их двойственная природа. С одной стороны, пары запрос-ответ ФНФ представляют собой уникальную характеристику устройства и тем самым могут быть использованы в качестве идентификатора. В то же время непустое подмножество пар запрос-ответ является нестабильным. Следовательно, ФНФ могут быть использованы для реализации генераторов случайных числовых последовательностей (ГСЧП). В отличие от генераторов псевдослучайных числовых последовательностей (ПГСЧП), основанных на физических реализациях математических моделей и алгоритмов, генераторы на основе ФНФ действительно случайны, что позволяет использовать их в аппаратных реализациях криптографических алгоритмов, например, в качестве генераторов секретных ключей.

В настоящее время существует два основных подхода к реализации ГСЧП, источником случайности которых является ФНФ [1]. Первый подход заключается в использовании ПГСЧП с периодически изменяемым случайным начальным состоянием, вырабатываемым ФНФ. Недостатком данного подхода являются дополнительные аппаратные затраты, требующиеся на реализацию ПГСЧП. Вторым подходом, в свою очередь, использует выходные значения ответов ФНФ, отбирая те из них, случайность которых максимальна. Одним из критериев случайности является соотношение нулей и единиц в формируемой последовательности ответов. Достоинством второго подхода являются небольшие аппаратные затраты, поскольку требуется реализовать только ФНФ. Недостатком является потеря производительности, необходимая для выбора подмножества пар запрос-ответ из экспоненциально большого множества, а также для непосредственного генерирования последовательности.

В работе [2] авторами был предложен ГСЧП на основе модифицированной ФНФ кольцевых генераторов. Генератор реализован на основе первого подхода, т. е. в качестве ПГСЧП были использованы дерево элементов XOR и одноканальный сигнатурный анализатор. Спроектированный генератор является реконфигурируемым, и его настройка осуществляется по четырем параметрам: длительность одиночного импульса X , количество элементов ФНФ кольцевых генераторов K , количество инверторов N в каждом блоке ФНФ, а также разрядность одноканального сигнатурного анализатора D . Генератор был реализован на ПЛИС Xilinx Spartan 3E-500 и по аппаратным затратам является более эффективным по сравнению с существующими решениями на основе ФНФ кольцевых генераторов.

ГСЧП на основе эмуляции элементов статического оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) был предложен авторами в работе [3]. Данный генератор реализован на основе первого подхода, поскольку использует адаптивный сигнатурный анализатор, применяемый для приведения вырабатываемой последовательности к равномерному статистическому распределению. Предложенная модификация ФНФ на основе эмуляции статического ОЗУ позволяет решить не только задачу генерирования случайных числовых последовательностей, но и идентификации. Кроме того, для ее реализации требуется как минимум в 4 раза меньше аппаратуры в сравнении с ФНФ на основе кольцевых генераторов [2]. Недостатком ГСЧП является необходимость асинхронного сброса для генерирования следующего случайного числа, что снижает производительность.

В работе [1] был сформулирован метод структурного синтеза ГСЧП на основе ФНФ, который является обобщением работ [2, 3]. Предложенный метод был рассмотрен на примере реализации трех различных ГСЧП: на основе ФНФ кольцевых генераторов, дерева XOR и одноканального сигнатурного анализатора; ФНФ на основе эмуляции СОЗУ и адаптивного сигнатурного анализатора; ФНФ типа арбитр и многоканального сигнатурного анализатора.

Авторами было показано, что использование ФНФ в качестве источника случайности позволяет проектировать ГСЧП с различной производительностью, аппаратными затратами и статистическими свойствами вырабатываемой последовательности. При этом характеристики генератора зависят только от выбора типа ФНФ и схемы ГПСЧП.

В работах [4–5] множество пар запрос-ответ ФНФ типа арбитр было разделено на подмножество стабильных и нестабильных. Ответы, соответствующие нестабильным парам, были использованы для генерирования случайной числовой последовательности. Разработанный алгоритм соответствует второму подходу к проектированию ГСЧП на основе ФНФ, поэтому не требует дополнительных аппаратных затрат, однако ухудшает скорость выработки случайной последовательности.

Разработанные авторами ГСЧП были проверены на соответствие стандарту NIST для действительно случайных числовых последовательностей. Было показано, что использование ФНФ в качестве источника случайности позволяет сократить аппаратные затраты, а также улучшить качество вырабатываемых случайных последовательностей по сравнению с существующими решениями.

Неклонированная идентификация и аутентификация

Для разработки методов неклонированной идентификации и аутентификации авторами была выбрана ФНФ типа арбитр (А-ФНФ) по причинам приемлемых аппаратных затрат, экспоненциально большой мощности множества пар запрос-ответ, а также высоких значений характеристик случайности и уникальности по сравнению с другими классическими реализациями ФНФ на ПЛИС типа FPGA (ФНФ кольцевых генераторов, ФНФ на основе памяти и ФНФ на основе бистабильных элементов).

Одной из главных проблем при использовании ФНФ в качестве генератора уникальных идентификаторов, а также при реализации протоколов аутентификации является наличие нестабильного подмножества пар запрос-ответ. Существует два основных класса подходов к решению данной проблемы: корректировка ответов и схемотехническое изменение ФНФ. Недостатком первого класса методов являются значительные аппаратные и временные затраты на реализацию кодов коррекции ошибок, если базовая стабильность ФНФ была невысокой. Второй класс подходов более специфичен к конкретным архитектурам ФНФ и, как правило, технически более сложен. К сожалению, существующие реализации классической архитектуры А-ФНФ обладают низкой стабильностью в силу перехода схемы арбитра в метастабильное состояние.

В работе [5] были предложены две схемотехнические модификации схемы арбитра: на основе четырех синхронных D-триггеров и на основе асинхронного RS-триггера. Первая модификация позволяет рассматривать не только передний фронт тестового сигнала для генерирования ответа А-ФНФ, а весь импульс в целом. Таким образом, предложенная схема позволяет обнаруживать разную длительность двух копий тестового сигнала, а также с большей вероятностью определять малые различия во времени прихода фронтов и спадов рассматриваемых сигналов. В основу второй модификации положено явление затухающего колебания асинхронного RS-триггера при попытке сохранить запрещенное состояние. Как было показано авторами, при небольших различиях во времени прихода спада тестового сигнала RS-триггер на выходе производит высокочастотное затухающее колебание, наличие которого свидетельствует о переходе триггера в метастабильное состояние. Предложенные схемотехнические модификации позволили значительно улучшить характеристику стабильности А-ФНФ при реализации на FPGA с 0,57 до 0,99 с учетом дополнительных аппаратных затрат, не превышающих 2 % от исходной реализации схемы арбитра. Для детального исследования особенностей схемных реализаций А-ФНФ в работе [7] была предложена мультиарбитражная схема, в которой арбитр помещается после каждого звена симметричных путей. Моделирование и реализация предложенной схемы показали зависимость такой характеристики, как стабильность, от длины симметричных путей. Было подтверждено, что, несмотря на переход арбитра в состояние метастабильности, возможно применение мультиарбитражной ФНФ для уникальной идентификации цифровых устройств. Кроме этого, экспериментально было продемонстрировано, что зависимость пар запрос-ответ имеет линейную природу.

В работах [4, 6, 8] была разработана математическая модель А-ФНФ, особенностью которой является описание метастабильного состояния арбитра. Предложенная модель позволяет улучшить характеристику стабильности А-ФНФ до 1,0 в условиях изменения температуры окружающей среды от -40 до 90° С без дополнительных аппаратных затрат. Модель описывает разности задержек распространения сигналов в виде линейной функции, которая зависит от бинарных значений запроса, а также уникальных характеристик каждого из звеньев А-ФНФ. На основе модели был разработан алгоритм классификации запросов, позволяющий разделить множество пар запрос-ответ на сильные, характеристика стабильности которых с высокой вероятностью (0,99) имеет высокое значение, и слабые, значения ответа для которых нестабильны. Предложенный алгоритм позволяет генерировать неклонированные идентификаторы с высоким значением характеристик уникальности (0,511) и стабильности (1,0). В свою очередь, на основе слабых пар запрос-ответ возможно построение ГСЧП.

Авторами было показано, что характеристики стабильности и случайности А-ФНФ являются обратно пропорциональными, т. е. улучшение одной из них ведет к ухудшению другой. Следовательно, модификации А-ФНФ с повышенной стабильностью ответов становятся уязвимы к моделированию с помощью методов машинного обучения. В свою очередь, данная уязвимость позволяет злоумышленнику осуществить криптографические атаки на протоколы безопасности, реализованные на основе А-ФНФ.

В работах [6, 9] были предложены модификации А-ФНФ с помощью регистра из Т-триггеров, а также многоканального сигнатурного анализатора MISR. Данный подход позволяет преобразовать линейную зависимость между значением запроса и ответа А-ФНФ в нелинейную, тем самым значительно усложняя задачу злоумышленника по осуществлению криптографической атаки. Таким образом, уязвимость А-ФНФ к классическим атакам с помощью метода опорных векторов и логистической регрессии была снижена с 98 до 50 %. Несмотря на это, предложенные модификации подвергаются криптографической атаке методом эволюционной стратегии адаптации ковариационных матриц, который в настоящее время является стандартом атак на ФНФ.

В работе [8] был предложен протокол аутентификации на основе А-ФНФ, который является практически стойким к атаке с помощью эволюционной стратегии. Вместо хранения экспоненциально большого множества пар запрос-ответ была предложена точная программная модель А-ФНФ, построенная на основе 5 классов пар запрос-ответ и 20-слойной искусственной нейронной сети. Для нелинейного преобразования запросов также был использован многоканальный сигнатурный анализатор. Эксперименты показали, что криптографическая атака может быть осуществлена, однако на ее осуществление потребуется более 100 лет работы многопроцессорного сервера.

Полученные в работах [4–6, 8–12] результаты показали, что реализация А-ФНФ на ПЛИС типа FPGA может быть использована для надежной неклонированной идентификации цифровых устройств, реализации протоколов аутентификации со сниженной уязвимостью к криптографическим атакам, а также генераторов случайных числовых последовательностей. Более того, все разработки, предложенные авторами, были экспериментально верифицированы с помощью реконфигурируемых аппаратно-программных комплексов, что позволяет сделать вывод о том, что предложенные решения могут быть также реализованы с помощью специализированных ИС.

В настоящее время проводятся исследования характеристик и особенностей функционирования интегральных схем динамических ОЗУ с целью построения на их основе уникальных неклонированных идентификаторов [13]. Кроме того, осуществляется поиск технических решений применения ФНФ для обеспечения безопасности IoT на примере инфраструктуры цифровых устройств умного дома [12].

Цифровые водяные знаки и схемотехническая обфускация

Проектные описания цифровых устройств составляются при помощи специальных языков проектирования аппаратуры HDL (Hardware Description Language). Так, HDL применяется для составления высокоуровневого описания цифровой схемотехники проектируемого устройства на различных уровнях абстракции. Типичное HDL-описание

содержит в себе информацию как о структуре устройства, так и о функционале всего устройства либо его составных компонент. Преобразование из HDL-описания в схемное описание называется синтезом и включает в себя множество этапов, в том числе структурную и логическую оптимизацию. В совокупности с использованием последовательных и параллельных HDL-операторов известные методы защиты программного обеспечения не могут быть применены для проектных описаний цифровых устройств. Например, хорошо зарекомендовавшие себя методы запутывающих преобразований (обфускации), защищающие исходные коды программ от обратного проектирования, и методы постановки водяных знаков, защищающие авторские права разработчиков, теряют свой смысл при процедурах RTL (Register Transfer Level) и технологического синтеза. Таким образом, разработка подобных методов защиты цифровых устройств и их проектных описаний являются актуальными научно-техническими задачами.

В работе [14] было дано определение аппаратного водяного знака (АВЗ) и описаны его свойства. Так, под АВЗ следует понимать цифровой водяной знак, встраиваемый в проектное описание цифрового устройства с целью защиты авторских прав проектировщика как на само проектное описание, так и на готовое цифровое устройство. При этом АВЗ должен нести уникальную информацию о проектировщике (и/или защищаемом устройстве), а процедура использования АВЗ содержит два этапа: встраивание и извлечение АВЗ. Было показано, что АВЗ должны удовлетворять следующему свойству: $DD(V) = SCH$; $DD(V^*) = SCH^*$; $FUNC(SCH) = FUNC(SCH^*)$, где V – проектное HDL-описание, V^* – описание, содержащее авторский водяной знак, DD – процедура синтеза, SCH – результирующее схемное представление устройства, SCH^* – схемное представление, содержащее водяной знак, $FUNC$ – функциональная спецификация устройства.

Процедура WM постановки АВЗ при этом формально описывается как $V^* = WM(V, K)$, где K – сообщение, однозначно идентифицирующее автора. В свою очередь, процедура EX извлечения АВЗ должна определять присутствие или отсутствие сообщения K в исходном описании V^* и/или синтезированной схеме SCH^* : $EX(V^*, K) = EX(SCH^*, K) = true$.

Процедура внедрения АВЗ не должна нарушать функциональную корректность проектного описания. Кроме того, АВЗ должен обладать следующими основными характеристиками [14]: стойкость, емкость, затраты на встраивание (извлечение), вносимые издержки, скрытность, прозрачность. На основе определенных характеристик АВЗ была создана их классификация [14] по назначению (идентификация автора, доказательство подлинности либо доказательство передачи), по уровням (одноуровневые и многоуровневые), по устойчивости к изменениям (устойчивые и хрупкие), по процессу построения (статические и динамические), по обнаруживаемости (детерминированные и вероятностные), по источникам извлечения (сторонние каналы, порты, бит-образы ПЛИС и др.). Было показано, что наиболее перспективными для реализации являются динамические многоуровневые АВЗ, внедряемые на различных уровнях абстракции проектных описаний, обладающие необходимыми перечисленными характеристиками. Так, динамические АВЗ обладают большей скрытностью в сравнении со статическими знаками, а наличие многоуровневых АВЗ позволяет им быть прозрачными для средств синтеза и оптимизации.

Для улучшения характеристики скрытности АВЗ дополнительно применяют запутывающие преобразования, именуемые обфускацией. В работах [15–17] было показано, что в большинстве случаев применение методов лексической обфускации для проектных описаний является неприемлемым ввиду трансляции высокоуровневых языковых HDL-конструкций различных уровней абстракции к схемотехническому представлению устройства. В работе [18] был предложен новый вид запутывающих преобразований, названный функциональной обфускацией, под которой понимается процесс применения запутывающих преобразований к цифровой схеме устройства SCH с целью получения более сложной для понимания схемы SCH^* , имеющей эквивалентную функциональность. Было показано, что методы функциональной обфускации должны обладать схожими характеристиками с АВЗ, и, в первую очередь, они должны быть прозрачными для средств синтеза и оптимизации.

Помимо функциональной обфускации применение лексической обфускации также важно для защиты проектных описаний от атак обратного проектирования. В свою очередь,

недостатком функциональной обфускации является увеличение аппаратной сложности и ухудшение временных характеристик устройства. Применение обоих типов обфускации обеспечивает высокий уровень защиты на всех стадиях жизненного цикла устройства.

Для оценки качества лексической обфускации в работе [18] была предложена новая метрика сложности проектных описаний с учетом особенностей языка проектирования VHDL:

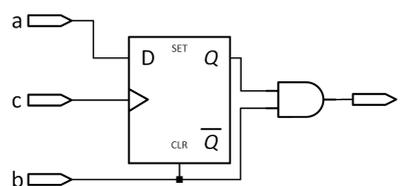
$$C(V) = \sum_{i=0}^8 (a_i * M_i), \text{ где } a_i - \text{весовой коэффициент, выбранный для метрики, } M_i - \text{рассчитанное}$$

значение i -й метрики проектного описания V . На многих отобранных примерах реальных проектных описаний было показано, что следующие перечисленные метрики являются значимыми для оценки общей сложности: M_1 – число операторов; M_2 – среднее число операторов в параллельном выражении; M_3 – число параллельных выражений; M_4 – число сигналов и переменных; M_5 – сцепление параллельных операторов; M_6 – средний размер списка чувствительных сигналов параллельных процессов; M_7 – число деклараций (типов, сигналов, переменных и т. д.); M_8 – метрика пространственной сложности. При верификации значений $C(V)$ было показано, что минимальные значения, вероятнее всего, свидетельствуют о хорошем качестве и стиле исходного VHDL-кода.

В области функциональной обфускации в работах [15, 17] были предложены схемотехнические решения построения так называемых генераторов константных значений CVG (Constant Value Generator), представляющие собой смешанные схемы, поведение которых описывается как переключательной, так и последовательностной логикой. Данное свойство позволяет схемам CVG быть прозрачными для средств синтеза, а вырабатываемые ими константные значения могут быть применены как для функциональной обфускации других цифровых компонент, так и для построения аппаратных водяных знаков (рисунок).

```
process( a, b, c ) begin
  if( b='1' ) then
    s <= '0';
  elsif ( rising_edge( c ) ) then
    s <= a;
  end if;
end process;
q <= s and b;
```

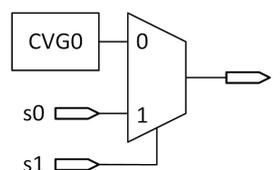
a



б

```
process(01001110i, 01001110i, 01001110i) begin
  n if(01001110i='1') then 01001110i<='0';
  elsif(rising_edge(01001110i)) then
    01001110i<=01001110i; end if; end
  process; 01001110i<=01001110i and
    01001110i;
```

в



г

Пример CVG: *a* – исходное VHDL-описание; *б* – результат лексической обфускации; *в* – результат синтеза CVG; *г* – применение CVG для функциональной обфускации

Результаты, полученные в области аппаратных водяных знаков и функциональной обфускации, были апробированы и доказали свою состоятельность для САПР программируемых логических интегральных схем, языков проектирования VHDL и Verilog.

Заключение

Научная группа под руководством А.А. Иванюка продолжает активно проводить исследования методов идентификации, аутентификации и генерирования случайных числовых последовательностей на основе физически неклонировуемых функций, реализуемых как на программируемых логических интегральных схемах, так и на запоминающих устройствах, в том числе на устройствах энергонезависимой флеш-памяти. Ведутся поиски новых схемотехнических решений ФНФ типа арбитр, конфигурируемых ФНФ и цифровых схем, позволяющих одновременно решать задачу неклонировуемой идентификации и генерирования СЧП.

Полученные научные результаты докладывались как на отечественных, так и на международных конференциях и симпозиумах, среди которых необходимо отметить

следующие: IEEE Asia and South Pacific Design Automation Conference, International Conference on Digital Technologies, IEEE International Symposium on Quality Electronic Design, IEEE International Symposium on Circuits & Systems, Информационные технологии и системы.

Экспериментальные исследования схемотехнических реализаций ФНФ при различных условиях окружающей среды с помощью температурной камеры, а также моделирование криптографических атак на ФНФ типа арбитр с помощью высокопроизводительных вычислительных серверов были проведены совместно с Наньянским технологическим университетом (Сингапур).

Некоторые научные результаты были включены в монографию «Secure System Design and Trustable Computing», выпущенную в 2016 году издательством Springer. В 2018 году результат, полученный в области надежной неклоняемой аутентификации цифровых устройств, был опубликован в престижном международном журнале «IEEE Transactions on Information Forensics and Security». В период с 2014 по 2018 год по представленным научным направлениям было защищено 10 дипломных проектов, восемь магистерских и одна кандидатская диссертация.

Список литературы

1. Design and Implementation of High-Quality Physical Unclonable Functions for Hardware-Oriented Cryptography. Secure System Design and Trustable Computing / S.S. Zalivaka [et al.]. Switzerland: Springer, 2016. Ch. 2. P. 39–81.
2. Заливако С.С., Иванюк А.А. Использование физически неклоняемых функций для генерирования действительно случайных числовых последовательностей // Автоматика и вычислительная техника. 2013. № 3. С. 61–72.
3. Заливако С.С., Иванюк А.А. Схемная реализация комбинированной физически неклоняемой функции для генерирования действительно случайных числовых последовательностей // Докл. БГУИР. 2013. № 7 (77). С. 37–43.
4. Заливако С.С., Иванюк А.А., Клыбик В.П. Метод увеличения стабильности физически неклоняемой функции типа «арбитр» // Информатика. 2017. № 1 (53). С. 31–43.
5. Multi-valued arbiters for quality enhancement of PUF responses on FPGA implementation / S.S. Zalivaka [et al.] // Invited Paper at Special Session on Cyber-Physical Systems and Security, in Proc. 21st IEEE Asia and South Pacific Design Automation Conf. (ASP-DAC 2016). Macao, China, 26–28 January 2016. P. 533–538.
6. Zalivaka S.S., Ivaniuk A.A., Chang C.H. FPGA Implementation of Modeling Attack Resistant Arbiter PUF with Enhanced Reliability // Invited Paper at Special Session on IoT Security: Protocol, Implementation and Attacks, in Proc. 18th IEEE International Symposium on Quality Electronic Design (ISQED 2017). Santa Clara, CA, USA, 13–15 March 2017. P. 313–318.
7. Klybik V.P., Ivaniuk A.A. Use of arbiter physical unclonable function to solve identification problem of digital devices // Automatic Control and Computer Sciences. 2015. Vol. 49, № 3. P. 139–147.
8. Zalivaka S.S., Ivaniuk A.A., Chang Ch.-H. Reliable and Modeling Attack Resistant Authentication of Arbiter PUF in FPGA Implementation With Trinary Quadruple Response // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. 2018. № 4 (14). P. 1109–1123.
9. Zalivaka S.S., Ivaniuk A.A., Chang C.H. Low-cost Fortification of Arbiter PUF Against Modeling Attack // Proc. of IEEE International Symposium on Circuits & Systems (ISCAS 2017). Baltimore, MD, USA, 28–31 May 2017. P. 1600–1603.
10. Заливако С.С., Иванюк А.А. Обзор методов активной идентификации цифровых устройств // Информатика. 2016. № 3 (51). С. 38–48.
11. Иванюк А.А. Особенности реализации симметричных путей ФНФ типа арбитр на ПЛИС // Матер. междунар. науч. конф. «Информационные технологии и системы 2018». Минск, 25 октября 2018 г. С. 156–157.
12. Клыбик В.П., Иванюк А.А. Перспективные возможности обеспечения безопасности инфраструктуры IoT // Матер. междунар. науч. конф. «Информационные технологии и системы 2018». Минск, 25 октября 2018 г. С. 162–163.
13. Пучков А.В., Иванюк А.А. Применение запоминающих устройств в качестве криптографических примитивов для интегральных схем программируемой логики // Материалы междунар. науч. конф. «Информационные технологии и системы 2016». Минск, 26 октября 2016 г. С. 210–211.
14. Сергейчик В.В., Иванюк А.А. Обзор методов реализации аппаратных водяных знаков в цифровых устройствах программируемой логики // Информатика. 2015. № 1 (45). С. 102–112.

15. Sergeichik V.V., Ivaniuk A.A. Implementation of opaque predicates for FPGA designs hardware obfuscation // *J. of Information, Control and Management Systems*. 2014. № 12 (2). P. 177–188.
16. Sergeichik V.V., Ivaniuk A.A. Digital Watermark and Fingerprint in Variable Rank Linear-Feedback Shift Register // *Automatic Control and Computer Sciences*. 2016. Vol. 50, № 2. P. 107–115.
17. Sergeichik V., Ivaniuk A. Hardware Primitives for FPGA Design Obfuscation // *Proceedings of the Section of Young Researchers and Scientists (SYRAS) on the 10th International Conference on Digital Technologies 2014*. Zilina, Slovakia, 9–11 July 2014. P. 39–44.
18. Сергейчик В.В., Иванюк А.А. Особенности обфускации VHDL-описаний и методы оценки ее сложности // *Информатика*. 2014. № 1 (41). С. 116–125.

References

1. Design and Implementation of High-Quality Physical Unclonable Functions for Hardware-Oriented Cryptography. *Secure System Design and Trustable Computing* / S.S. Zalivaka [et al.]. Switzerland: Springer, 2016. Ch. 2. P. 39–81.
2. Zalivako S.S., Ivanjuk A.A. Ispol'zovanie fizicheski nekloniruemykh funktsiy dlja generirovaniya dejstvitel'no sluchajnykh chislovykh posledovatel'nostej // *Avtomatika i vychislitel'naja tehnika*. 2013. № 3. S. 61–72. (in Russ.)
3. Zalivako S.S., Ivanjuk A.A. Shemnaja realizacija kombinirovannoj fizicheski nekloniruemoj funktsii dlja generirovaniya dejstvitel'no sluchajnykh chislovykh posledovatel'nostej // *Dokl. BGUIR*. 2013. № 7 (77). S. 37–43. (in Russ.)
4. Zalivako S.S., Ivanjuk A.A., Klybik V.P. Metod uvelichenie stabil'nosti fizicheski nekloniruemoj funktsii tipa «arbitr» // *Informatika*. 2017. № 1 (53). S. 31–43. (in Russ.)
5. Multi-valued arbiters for quality enhancement of PUF responses on FPGA implementation / S.S. Zalivaka [et al.] // *Invited Paper at Special Session on Cyber-Physical Systems and Security*, in Proc. 21st IEEE Asia and South Pacific Design Automation Conf. (ASP-DAC 2016). Macao, China, 26–28 January 2016. P. 533–538.
6. Zalivaka S.S., Ivaniuk A.A., Chang C.H. FPGA Implementation of Modeling Attack Resistant Arbiter PUF with Enhanced Reliability // *Invited Paper at Special Session on IoT Security: Protocol, Implementation and Attacks*, in Proc. 18th IEEE International Symposium on Quality Electronic Design (ISQED 2017). Santa Clara, CA, USA, 13–15 March 2017. P. 313–318.
7. Klybik V.P., Ivaniuk A.A. Use of arbiter physical unclonable function to solve identification problem of digital devices // *Automatic Control and Computer Sciences*. 2015. Vol. 49, № 3. P. 139–147.
8. Zalivaka S.S., Ivaniuk A.A., Chang Ch.-H. Reliable and Modeling Attack Resistant Authentication of Arbiter PUF in FPGA Implementation With Trinary Quadruple Response // *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*. 2018. № 4 (14). P. 1109–1123.
9. Zalivaka S.S., Ivaniuk A.A., Chang C.H. Low-cost Fortification of Arbiter PUF Against Modeling Attack // *Proc. of IEEE International Symposium on Circuits & Systems (ISCAS 2017)*. Baltimore, MD, USA, 28–31 May 2017. P. 1600–1603.
10. Zalivako S.S., Ivanjuk A.A. Obzor metodov aktivnoj identifikatsii cifrovyykh ustrojstv // *Informatika*. 2016. № 3 (51). S. 38–48. (in Russ.)
11. Ivanjuk A.A. Osobennosti realizatsii simmetrichnykh putej FNF tipa arbitr na PLIS // *Mater. mezhdunar. nauch. konf. «Informacionnye tehnologii i sistemy 2018»*. Minsk, 25 oktjabrja 2018 g. S. 156–157. (in Russ.)
12. Klybik V.P., Ivanjuk A.A. Perspektivnye vozmozhnosti obespechenija bezopasnosti infrastruktury IoT // *Mater. mezhdunar. nauch. konf. «Informacionnye tehnologii i sistemy 2018»*. Minsk, 25 oktjabrja 2018 g. S. 162–163. (in Russ.)
13. Puchkov A.V., Ivanjuk A.A. Primenenie zapominajushchih ustrojstv v kachestve kriptograficheskikh primitivov dlja integral'nykh shem programmiruemoj logiki // *Materialy mezhdunar. nauch. konf. «Informacionnye tehnologii i sistemy 2016»*. Minsk, 26 oktjabrja 2016 g. S. 210–211. (in Russ.)
14. Sergeichik V.V., Ivanjuk A.A. Obzor metodov realizatsii apparatnykh vodjanykh znakov v cifrovyykh ustrojstvakh programmiruemoj logiki // *Informatika*. 2015. № 1 (45). S. 102–112. (in Russ.)
15. Sergeichik V.V., Ivaniuk A.A. Implementation of opaque predicates for FPGA designs hardware obfuscation // *J. of Information, Control and Management Systems*. 2014. № 12 (2). P. 177–188.
16. Sergeichik V.V., Ivaniuk A.A. Digital Watermark and Fingerprint in Variable Rank Linear-Feedback Shift Register // *Automatic Control and Computer Sciences*. 2016. Vol. 50, № 2. P. 107–115.
17. Sergeichik V., Ivaniuk A. Hardware Primitives for FPGA Design Obfuscation // *Proceedings of the Section of Young Researchers and Scientists (SYRAS) on the 10th International Conference on Digital Technologies 2014*. Zilina, Slovakia, 9–11 July 2014. P. 39–44.
18. Sergeichik V.V., Ivanjuk A.A. Osobennosti obfuskatsii VHDL-opisanij i metody ocenki ee slozhnosti // *Informatika*. 2014. № 1 (41). S. 116–125. (in Russ.)

Сведения об авторах

Иваниук А.А., д.т.н., доцент, профессор кафедры информатики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Заливако С.С., к.т.н., доцент кафедры информатики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-80-20;
e-mail: ivaniuk@bsuir.by
Иваниук Александр Александрович

Information about the authors

Ivaniuk A.A., D.Sci, associate professor, professor of computer science department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Zalivaka S.S., PhD, associate professor of computer science department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki st., 6
Belarusian state university
of informatics and radioelectronics
tel. +375-17-293-80-20;
e-mail: ivaniuk@bsuir.by
Ivaniuk Alexander Alexandrovich

УДК 62-83

МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИКИ НА ГИБРИДНЫХ ПРИВОДАХ ПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ

С.Е. КАРПОВИЧ, И.В. ДАЙНЯК, В.В. КУЗНЕЦОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 8 февраля 2019

Аннотация. Представлены результаты по дальнейшему развитию теории разработки и принципов создания мехатронных систем координатных перемещений с повышенными характеристиками точности и быстродействия, построенных на реконфигурируемых механизмах параллельной кинематики и гибридных многокоординатных приводах прямого действия. Приведены некоторые из разработанных систем перемещений с примером алгоритмизации математических моделей для имитационного моделирования их кинематики, динамики и управления. Представлены перспективы использования полученных результатов при разработке прецизионного сборочного и оптико-механического оборудования для микроэлектроники.

Ключевые слова: мехатронные системы, механизмы параллельной кинематики, привод прямого действия, алгоритмизация моделей, имитационное моделирование.

Abstract. The results of the further development of the theory of creating of mechatronic coordinate displacement systems with enhanced characteristics of accuracy and speed based on reconfigurable mechanisms of parallel kinematics and hybrid multi-axis direct-acting drives are presented. Some of the developed displacement systems with an example of algorithmic mathematical models for simulation modeling of their kinematics, dynamics and control are given. The prospects for the use of the results obtained in the development of precision assembly and optical-mechanical equipment for microelectronics are presented.

Keywords: mechatronic systems, mechanisms of parallel kinematics, direct drive, model algorithmization, simulation modeling.

Doklady BGUIR. 2019, Vol. 120, No. 2, pp. 59-72

Mechatronic system of parallel kinematics on hybrid direct action drivers

S.E. Karpovich, I.V. Dainiak, V.V. Kuzniatsou

Введение

В настоящее время особенно остро ставится задача дальнейшей интенсификации производства, повышения его эффективности и обеспечения выпуска конкурентоспособной продукции. Достижение этих целей возможно лишь при осуществлении существенного роста производительности технологического оборудования и наиболее полной его автоматизации. Для приборостроения и микроэлектроники также остро ставится проблема повышения точности, связанная с развитием мехатроники, микромеханики и особенно с высокими темпами уменьшения топологической нормы при производстве изделий электронной техники. Эффективным средством реализации этих целей является широкое внедрение и применение гибкого автоматизированного оборудования, построенного на мехатронных системах перемещений, представляющих собой механо-аппаратно-программные комплексы, управляемые от ЭВМ и работающие по принципу гибких перенастраиваемых на требуемую технологию систем.

Особая роль и возможности многокоординатного синхронного привода в спецтехнологическом автоматизированном оборудовании определяется полной

автономностью каждого координатного модуля по питанию и управлению, способностью конфигурирования модулей с другими однотипными координатными позиционерами в зависимости от конструктивной геометрии статора, встраиваемого в единое технологическое пространство конкретного оборудования. Все это предопределило реализованные авторами подходы к построению систем многокоординатных перемещений [1–10], которые обладают способностью конфигурирования и комбинирования однотипных координатных позиционеров в гибридный многокоординатный синхронный привод с жестким программным согласованием в единой системе координат всех производственных и транспортных перемещений на основе алгоритмов совместной и бесколлизийной работы. Технической основой для построения сложных движений служат электромагнитные модули координатных перемещений с электрическим дроблением шага [11–21], позволяющие универсально и технически просто преобразовывать цифровую информацию в требуемые законы и изменения фазных токов, формирующих, в конечном итоге, требуемые траекторные движения.

Все многообразие систем перемещений на модулях движения многокоординатных приводов прямого действия в полной мере зависит от конфигурации самого привода [4]. В настоящее время разработаны электромагнитные модули движения с числовым управлением различных типов: однокоординатные линейные, однокоординатные поворотные, двухкоординатные планарные, на базе которых строится все многообразие многокоординатных приводов с числом внутренней подвижности, определяемой числом электромагнитных модулей. Тем самым внутренняя подвижность системы перемещения может быть любая, определяемая технологическим процессом.

Эффективным средством решения описанных выше проблем является широкое внедрение и применение гибкого автоматизированного оборудования, построенного на системах перемещений параллельной кинематики с гибридным приводом прямого действия. Для таких систем профессором С. Е. Карповичем была предложена концепция управляемого движения в трехмерном пространстве на базе многокоординатного привода прямого действия и реконфигурируемых механизмов параллельной кинематики.

Исследования в этом направлении на протяжении более 20 лет проводятся в БГУИР в НИГ 3.2 «Мехатроника и микросистемы», а также в совместной учебно-научной лаборатории БГУИР и ГНПО «Планар» под научным руководством профессора С. Е. Карповича. По результатам исследований в этом научном направлении защищено 5 докторских и более 20 кандидатских диссертаций аспирантами, докторантами и другими соискателями научных степеней, включая научных сотрудников ГНПО «Планар».

Разработаны подходы к построению систем многокоординатных перемещений на механизмах параллельной кинематики. Базовыми элементами рассматриваемых систем являются многокоординатные системы гибридных приводов, построенные на управляемых синхронных шаговых модулях линейного, поворотного и планарного типов и механизмах параллельной кинематики со структурой пространственных групп Ассура третьего класса в виде различных схемных и конструктивных исполнений. Структурно-кинематическое согласование этих элементов в систему многокоординатных перемещений, в конечном итоге, дает возможность получить все многообразие последних с возможностью реконфигурирования и адаптации при встраивании в конкретное оборудование.

Предложена и научно обоснована концепция модульного построения электромеханических преобразователей синхронных шаговых двигателей, принцип действия которых основан на взаимодействии магнитных полей дискретных электромагнитных фазных модулей и периодического стационарного магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами, сконфигурированными в виде пространственной линейной или круговой чередующейся магнитной последовательности. Благодаря этому решению появилась возможность существенно увеличить магнитную индукцию в рабочем зазоре электромагнитного преобразователя и тем самым расширить возможности систем координатных перемещений по динамическим показателям, обеспечивая в 2–3 раза увеличение скорости и ускорения по сравнению с традиционным линейным шаговым двигателем. На основании полученных результатов имитационного моделирования предложены четыре типа конструктивного исполнения шаговых электроприводов прямого действия для систем координатных перемещений автоматизированного оборудования [3].

Для реализации сложных пространственных движений предложено использовать механизмы параллельной кинематики, реконфигурируемые в зависимости от конструктивной конфигурации многокоординатного синхронного привода. Разработаны различные конфигурации исполнительных систем многокоординатных перемещений, включающие системы перемещений на кольцевом сегментном приводе, системы перемещений на многокоординатном приводе с треугольным статором, системы перемещений на трех планарных позиционерах и системы перемещений на комбинированном гибридном шестикоординатном приводе. Проводилась алгоритмизация их математических моделей и имитационное компьютерное моделирование в среде MATLAB кинематических, динамических и предельных эксплуатационных характеристик, связанных с обеспечением требуемого движения рабочей платформы в трехмерном пространстве [2, 26–35].

Разрабатывались новые методы и средства построения и реализации управляющих алгоритмов, позволяющих реализовывать управление системами многокоординатных перемещений в режиме реального времени. Так, за основу одного из разработанных методов, был принят метод оценочных функций, позволяющий синтезировать вычислительные структуры, называемые интерполяторами, с помощью которых осуществляются расчеты шаговых траекторий и выработка сигналов на управляющие входы исполнительных двигателей многокоординатного привода [1, 31]. При использовании представленных алгоритмов возможно формирование траекторий высокого порядка, задаваемых на плоскости и в трехмерном пространстве. Для этих алгоритмов характерны простота расчета, отсутствие накапливающейся погрешности, возможность автоматизации подготовки исходной информации для цифровых управляющих аппаратных средств.

Для реализации режима управления реальным временем предложено использовать современную информационную технологию EtherCAT, использующую в качестве среды передачи данных сеть Ethernet. Уникальный функциональный принцип аппаратной обработки информации «на лету» без промежуточной буферизации дает возможность получить время цикла шины в диапазоне микросекунд, а не миллисекунд, что позволяет полностью использовать ресурс системы для решения в реальном времени задач генерации траекторий, сплайн-интерполяции, обработки сигналов датчиков, расчета положения и скорости объекта управления.

В настоящей статье представлены некоторые из полученных авторами результатов по дальнейшему развитию теории разработки и принципов создания прецизионных мехатронных систем многокоординатных перемещений на основе предложенного современного цифрового многокоординатного привода и реконфигурируемых механизмов параллельной кинематики.

Системы многокоординатных перемещений на механизмах параллельной кинематики

На основе общих теоретических подходов [1, 3] авторами были разработаны исполнительные механизмы параллельной кинематики, конфигурируемые из пространственной структурной группы Ассур при числе звеньев $4 \leq n \leq 7$ и одной из систем многокоординатных приводов, реализуемых на шаговых двигателях линейного, поворотного и планарного типов. Таким образом, на основании этих структур могут быть предложены различные конструктивные исполнения систем перемещений. В качестве примеров в статье рассмотрены три системы перемещений на трех различных многокоординатных приводах прямого действия: кольцевого, с треугольным статором и планарного типа.

Система перемещений на кольцевом сегментном приводе. Система перемещений на кольцевом сегментном приводе (рис. 1) определяется конфигурацией многокоординатного кольцевого привода с шестью подвижными сегментными модулями. Она является механо-аппаратно-программным комплексом, относящимся к классу мехатронных систем перемещений, и состоит из механизма параллельной кинематики со структурой $n = 7$, $p_3 = 9$ и шестикоординатного кольцевого привода, в котором управление всеми координатами происходит через специальный контроллер от программы верхнего уровня, управляющей ЭВМ.

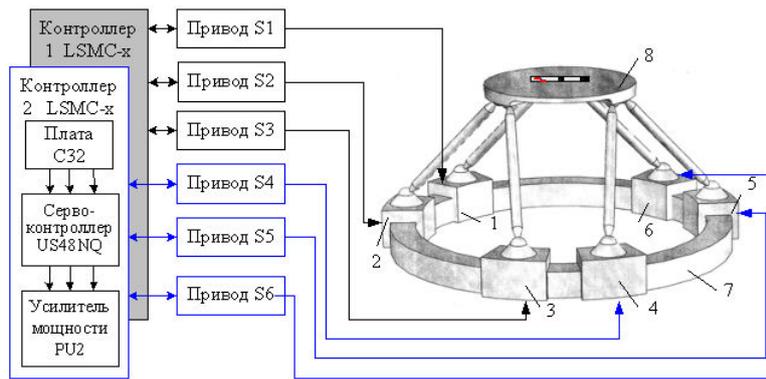


Рис. 1. Система перемещений на кольцевом сегментном приводе

Система перемещений на кольцевом сегментном приводе (рис. 1) состоит из механизма параллельной кинематики и многокоординатного привода, представляющего собой гибридную структуру из сегментных синхронных двигателей 1, 2, ..., 6, которые через сферические шарниры передают управляемое движение на рабочую платформу 8.

Исполнительные двигатели в виде подвижных сегментов, расположенных на кольцевом статоре, по образующей которого регулярно уложены постоянные магниты, имеют автономные управления их перемещениями. В результате этого в рассматриваемом случае обеспечивается внутренняя подвижность с шестью степенями свободы.

В качестве конструктивного прототипа авторами был принят поворотный синхронный сегментный двигатель серии RSMS - M36, разработанный и выпускаемый на предприятии «Рухсервомотор» (Минск). Он конструктивно состоит из одного или нескольких неподвижных сегментов с трехфазной системой обмоток, залитых теплопроводящим компаундом, и подвижного стального кольца статора (ротора) с регулярно наклеенными редкоземельными постоянными магнитами. В систему такого двигателя может быть встроен инкрементный датчик положения для реализации регулирования по законам перемещения.

На этой базе был предложен многокоординатный кольцевой двигатель [14], полученный из прототипа путем инверсии его механики, когда в качестве неподвижного был принят ротор, а неподвижные сегменты статора были приняты подвижными, автономно управляемыми, число которых может быть как два, так и более. На рис. 2 представлен кольцевой двухкоординатный двигатель, состоящий из неподвижного статора 2 и двух подвижных координатных сегментов 1 и 3. На основании инверсионной компоновки авторами был разработан многокоординатный привод для систем перемещений с числом степеней свободы до шести включительно. Кроме того, отличительной особенностью таких систем является способность реализации неограниченного поворота вокруг вертикальной оси.

Рассматриваемая система перемещений состоит из механизма параллельной кинематики в виде раскрывающегося тетраэдра и трехкоординатного кольцевого сегментного двигателя. Механизм параллельной кинематики построен на группе Асура третьего класса, которая состоит из трех шатунов в виде треугольных звеньев 8 – 9, 10 – 11, 12 – 13, связанных сферическими шарнирами 5, 6, 7 с управляемыми подвижными сегментными модулями 2, 3, 4, а соответствующими вращательными шарнирами – с подвижной треугольной платформой. При перемещении сегментных модулей 2, 3, 4 по неподвижной кольцевой направляющей статора 1, их движение через сферические шарниры, шатуны и вращательные шарниры механизма параллельной кинематики передается на исполнительное звено – треугольную платформу 23, которая принимает однозначное положение и ориентацию в трехмерном пространстве. Система перемещений (рис. 3) позволяет реализовывать прецизионные движения по шести взаимосвязанным координатам в трехмерном пространстве, включая три линейные и три угловые, обеспечивая высокие точностные и динамические характеристики перемещения объекта. При этом обеспечивается технический результат при довольно простой и дешевой в изготовлении конструкции самого исполнительного механизма. Способность реализации дополнительного переносного движения управляемого разворота вокруг вертикальной оси в диапазоне $\pm 360^\circ$ расширяет область управляемого движения платформой.

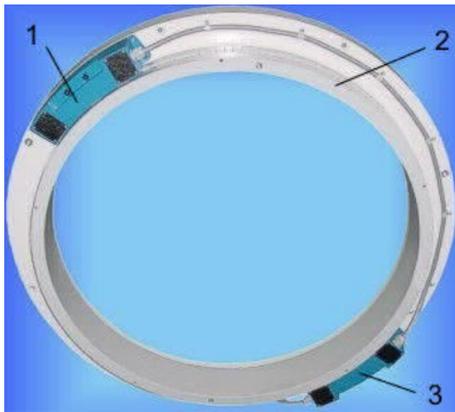


Рис. 2. Кольцевой двухкоординатный двигатель

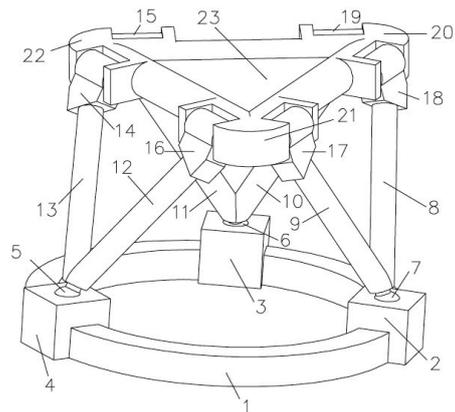


Рис. 3. Система перемещений с тремя степенями свободы

Система перемещений на многокоординатном приводе с треугольным статором. Система перемещений на шестикоординатном приводе с треугольным статором, представленная на рис.4, состоит из треугольного статора 1 с зубцовой нарезкой, по направляющим которой перемещаются подвижные линейные модули 2, 3..., 7, движение которых через промежуточные шатуны 8, 9..., 13 передается на подвижную платформу 14. При этом линейные перемещения шести подвижных модулей преобразуются в сложное движение платформы с шестью степенями свободы.

Принципиальная схема конструкции одного подвижного модуля треугольного линейного шагового двигателя приведена на рис. 5.

Синхронный шаговый двигатель состоит из основания 1, на котором расположен статор, включающий магнитопровод 2 и постоянные магниты 3, расположенные с чередующей полярностью магнитных полюсов вдоль направления перемещения.

На основании 1 закреплены две линейные направляющие 4 с подшипниками 5, на которых с помощью каретки 6 закреплен якорь двигателя. Якорь состоит из ряда П-образных магнитопроводов 7 с обмотками 8 управления, закрепленных с помощью теплопроводящего компаунда и выступов в металлическом немагнитном, например, из дюралюминия, корпусе 9. Корпус 9 с помощью несущей балки 10 крепится к каретке 6 и теплоизолирован от нее и балки 10 посредством прокладок 11. Для подведения потока охлаждающей жидкости корпус 9 снабжен каналами 12.

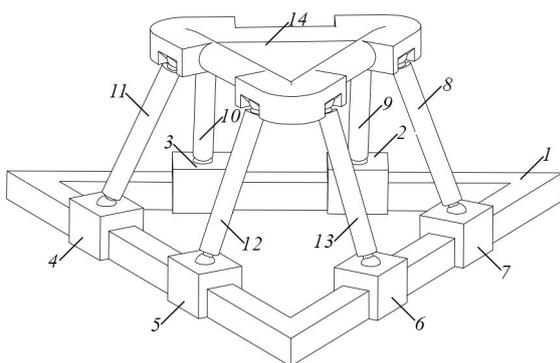


Рис. 4. Система перемещений на треугольном приводе

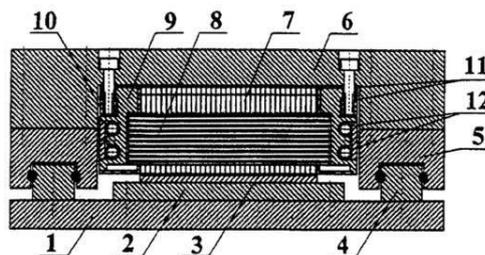


Рис. 5. Конструкция подвижного модуля

Система перемещений на планарных приводах прямого действия. Рассматриваемая система перемещений на планарных приводах прямого действия, представленная на рис. 6, сконфигурирована из многокоординатного привода прямого действия на трех планарных позиционерах и механизма параллельной кинематики в виде подвижного раскрывающегося тетраэдра [3, 26].

Она обладает шестью степенями свободы и состоит из группы Ассура третьего класса (звенья 5, 6, 7, 8) и шестикоординатного привода в виде трех управляемых планарных позиционеров 1, 2, 3, перемещающихся на одном общем для них плоском статоре 4. Такая конструктивная особенность системы перемещений накладывает специфические требования, которые необходимо учитывать при разработке алгоритмов для имитационного моделирования ее кинематики [30]. Планарный позиционер представляет собой двухкоординатный линейный шаговый двигатель с совмещенными координатами, которые содержат зубчатый ферромагнитный статор и индуктор, выполненный в виде плоского корпуса. Симметрично относительно центра корпуса расположены и закреплены электромагнитные модули каждой координаты. Индуктор находится над статором на небольшом расстоянии порядка 10–30 мкм, которое создается благодаря уравниванию сил притяжения индуктора к статору, создаваемых за счет электромагнитных модулей, и сил отталкивания, создаваемых сжатым воздухом.

Особенность такой конструкции состоит в появлении угловых колебаний индуктора вокруг вертикальной оси, причем амплитуда и частота этих колебаний зависит от температуры. Двухкоординатный планарный позиционер обладает высокими точностными и динамическими показателями за счет того, что электромагнитные модули выполнены однофазными, что дополнительно позволяет обеспечить их симметрирование относительно осей корпуса, параллельных координатам перемещений. Электромагнитные модули одной координаты позиционера расположены около оси корпуса параллельно другой координате. Такая ортогональная компоновка магнитных модулей позволяет реализовать систему перемещения по двум независимым ортогональным координатам в плоскости перемещения.

Для достижения высоких точностей по координатам и контурным перемещениям используется система измерений на однотипных датчиках линейных перемещений, построенная на базе интерферометров с двухчастотным лазером (рис. 7).

Это позволяет при автоматическом управлении реализовывать обратные связи по положению, скорости и ускорения в режиме реального времени и обеспечивать высокую динамику (скорость до 1 м/с, ускорения до 30 м/с²) при точности и повторяемости в пределах от 1 до 5 мкм.

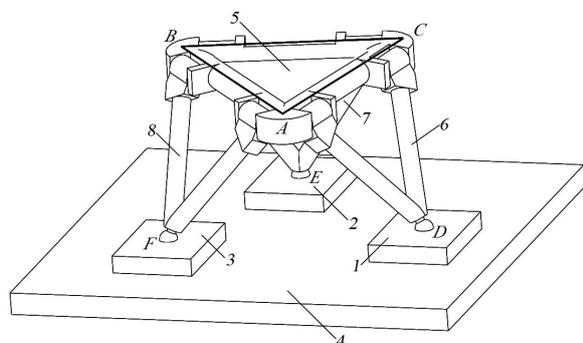


Рис. 6. Система перемещений на трех планарных позиционерах

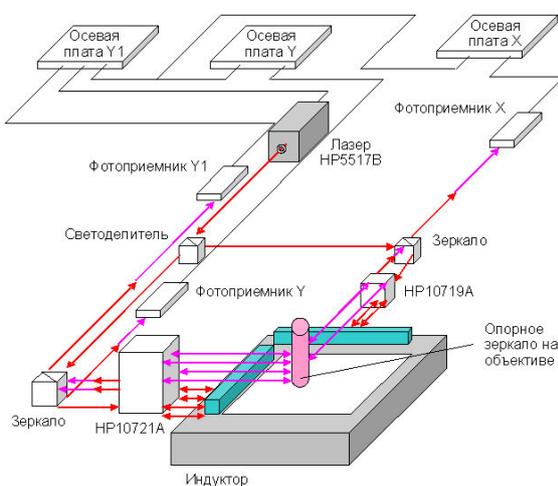


Рис. 7. Позиционная система измерений

Основные разработанные системы перемещений и многокоординатные гибридные привода прямого действия для мехатронных систем параллельной кинематики запатентованы авторами [11–20].

Программируемые движения мехатронной системы параллельной кинематики

Разработанные авторами подходы к построению программируемых движений для мехатронных систем параллельной кинематики реконфигурируемой структуры ниже будут проиллюстрированы на примере системы перемещений «ТриПланар», созданной

в техническом университете г. Ильменау (Германия) при участии НИГ 3.2 «Мехатроника и микросистемы» БГУИР (научный руководитель профессор С. Е. Карпович) и предприятию «Рухсервомотор» (г. Минск).

Система перемещений «ТриПланар» на трех планарных позиционерах (рис. 8) разработана на предложенном механизме параллельной кинематики [3], который обеспечивает перемещение рабочей платформы с инструментом с шестью степенями свободы. Она предназначена для прецизионной обработки фасонных наружных поверхностей, фасонного фрезерования внутренних поверхностей сложных деталей. Система также может быть использована для механической обработки, включая финишную, сферических и асферических линз объективов для генераторов изображений и другого оптико-механического оборудования микро- и нанoeлектроники.

Система перемещений «ТриПланар» включает три планарных позиционера, которые между собой связаны механизмом параллельной кинематики в виде раскрывающегося тетраэдра, состоящего из шарнирных треугольных звеньев. Структурно-кинематическая схема рассматриваемой системы перемещений представлена на рис. 9. При этом треугольные звенья 6, 7, 8 предпочтительно изготавливать, из соображений унификации, в виде одинаковых равнобедренных треугольников, а планарные позиционеры 1, 2, 3 использовать серийной стандартной конструкции [3] в проекции на статор 4, представляющий квадратный контур. Планарные позиционеры кинематически связаны с подвижной платформой через механизм параллельной кинематики. Треугольное звено DEF представляет собой подвижную в пространстве платформу, с которой связана подвижная система координат $S_1(x_1, y_1, z_1)$, а неподвижная система координат $S_0(x_0, y_0, z_0)$ связана с неподвижным статором 4.



Рис. 8. Фотография системы перемещений

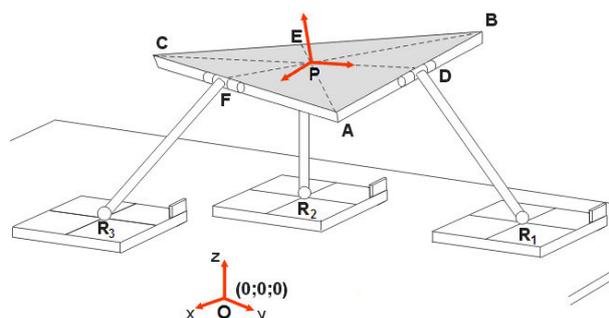


Рис. 9. Структурно-кинематическая схема системы перемещений

К преимуществам системы перемещений, построенной на трех планарных позиционерах, можно отнести: возможность перемещения платформы с шестью степенями свободы; возможность расширения рабочей области за счет увеличения размеров статора; высокая долговечность благодаря использованию магнитно-воздушной опоры; высокие динамические и точностные показатели, включая повторяемость исполнения одинаковых команд; высокая жесткость и одновременно высокая кинематическая гибкость системы.

Для реализации управления системой перемещений по шести независимым координатам, определяющим положение и ориентацию платформы, авторами был предложен аналитический подход [6], на базе которого разработаны алгоритмы решения прямой и обратной задач кинематики с использованием инструментов среды MATLAB.

Алгоритмизация математической модели. В среде MATLAB была разработана функция `plat_posit_has.m`, позволяющая формировать задание на перемещение платформы. После ввода пользователем входных параметров движения (траектория, скорость, ускорение) осуществляется цикл расчетов, результатом которых является массив, включающий шесть обобщенных координат положения и ориентации платформы и параметр время. На базе сформированного функцией `plat_posit_has.m` массива координат производится вычисление

текущих ортогональных координат (x, y) каждого из трех планарных позиционеров. Для определения векторов элементарных перемещений для каждого из трех планарных позиционеров на каждом шаге траектории в MATLAB разработана функция `lsm_inverse.m`, позволяющая решать обратную задачу кинематики по предложенному авторами сегментированному алгоритму.

Конечное аналитическое представление вычислительного алгоритма по определению шести линейных ортогональных координат $x_{R_1}, y_{R_1}, x_{R_2}, y_{R_2}, x_{R_3}, y_{R_3}$, определяющих соответствующие положения трех планарных позиционеров в системе координат $S_0(x_0, y_0, z_0)$ плоскости статора, имеют вид:

$$x_{R_1} = \frac{1}{A_1} \left(\frac{B_1 \frac{y_D A_1^2 - D_1 B_1 - x_D A_1 B_1}{A_1^2 + B_1^2} +}{\frac{A_1 \sqrt{-2y_D D_1 B_1 - (A_1 x_D + B_1 y_D)^2 + (l^2 - z_D^2)(A_1^2 - B_1^2)} - D_1^2 - 2A_1 x_D D_1 + D_1}{A_1^2 + B_1^2}} \right);$$

$$y_{R_1} = \left(\frac{B_1 \frac{y_D A_1^2 - D_1 B_1 - x_D A_1 B_1}{A_1^2 + B_1^2} +}{\frac{A_1 \sqrt{-2y_D D_1 B_1 - (A_1 x_D + B_1 y_D)^2 + (l^2 - z_D^2)(A_1^2 - B_1^2)} - D_1^2 - 2A_1 x_D D_1}{A_1^2 + B_1^2}} \right);$$

$$x_{R_2} = \frac{1}{A_2} \left(\frac{B_2 \frac{y_E A_2^2 - D_2 B_2 - x_E A_2 B_2}{A_2^2 + B_2^2} +}{\frac{A_2 \sqrt{-2y_E D_2 B_2 - (A_2 x_E + B_2 y_E)^2 + (l^2 - z_E^2)(A_2^2 - B_2^2)} - D_2^2 - 2A_2 x_E D_2 + D_2}{A_2^2 + B_2^2}} \right);$$

$$y_{R_2} = \left(\frac{B_2 \frac{y_E A_2^2 - D_2 B_2 - x_E A_2 B_2}{A_2^2 + B_2^2} +}{\frac{A_2 \sqrt{-2y_E D_2 B_2 - (A_2 x_E + B_2 y_E)^2 + (l^2 - z_E^2)(A_2^2 - B_2^2)} - D_2^2 - 2A_2 x_E D_2}{A_2^2 + B_2^2}} \right);$$

$$x_{R_3} = \frac{1}{A_3} \left(\frac{B_3 \frac{y_F A_3^2 - D_3 B_3 - x_F A_3 B_3}{A_3^2 + B_3^2} +}{\frac{A_3 \sqrt{-2y_F D_3 B_3 - (A_3 x_F + B_3 y_F)^2 + (l^2 - z_F^2)(A_3^2 - B_3^2)} - D_3^2 - 2A_3 x_F D_3 + D_3}{A_3^2 + B_3^2}} \right);$$

$$y_{R_3} = \left(\frac{B_3 \frac{y_F A_3^2 - D_3 B_3 - x_F A_3 B_3}{A_3^2 + B_3^2} +}{\frac{A_3 \sqrt{-2y_F D_3 B_3 - (A_3 x_F + B_3 y_F)^2 + (l^2 - z_F^2)(A_3^2 - B_3^2)} - D_3^2 - 2A_3 x_F D_3}{A_3^2 + B_3^2}} \right);$$

где $x_D, y_D, z_D, x_E, y_E, z_E, x_F, y_F, z_F$ – координаты базовых расчетных точек D, E, F платформы соответственно;

$$A_1 = x_B - x_A; B_1 = y_B - y_A; C_1 = z_B - z_A; D_1 = -A_1 x_D - B_1 y_D - C_1 z_D;$$

$$A_2 = x_C - x_B; B_2 = y_C - y_B; C_2 = z_C - z_B; D_2 = -A_2 x_E - B_2 y_E - C_2 z_E;$$

$$A_3 = x_A - x_C; B_3 = y_A - y_C; C_3 = z_A - z_C; D_3 = -A_3 x_F - B_3 y_F - C_3 z_F; B_3 = y_A - y_C.$$

Полученное координатное задание на перемещения планарных позиционеров поступает на контроллер системы управления, в котором оно преобразуется в соответствующие команды управления для силовых драйверов многокоординатного привода.

Динамическая имитационная модель

Построение имитационной динамической модели мехатронных систем перемещений выполняется при помощи встроенной среды Simulink в программный продукт MATLAB с использованием пакетов Simscape Multibody и Simscape Multibody Link, которые позволяют: разрабатывать 3D-модели рассматриваемой системы перемещений в Autodesk Inventor с определенными конструктивными параметрами, определяющими массогабаритные и инерционные характеристики; конвертировать созданную модель в Autodesk Inventor с помощью пакета Simscape Multibody среды Simulink в блочно-модульную схему рассматриваемого механизма параллельной кинематики. Обобщенная блочно-модульная схема имитационной динамической модели представлена на рис. 10.

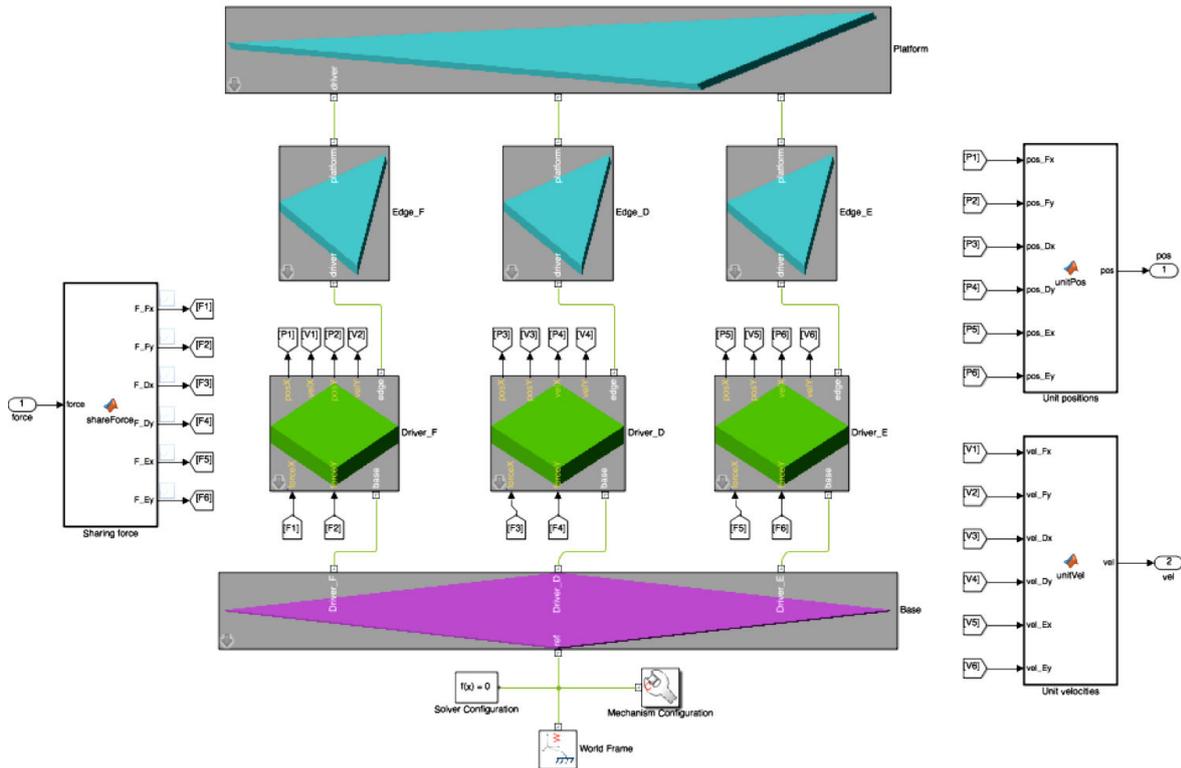


Рис. 10. Обобщенная блочно-модульная схема

Представленная схема включает блок *Sharing force* для подачи массива сил на планарные позиционеры, статор *Base*, планарные позиционеры *Driver_F*, *Driver_D*, *Driver_E*, связывающие элементы *Edge_F*, *Edge_D*, *Edge_E*, представляющие боковые звенья механизма и статор. Боковые звенья, в свою очередь, находятся в непосредственном контакте с рабочей платформой *Platform*.

Таким образом, имитационное моделирование динамики рассматриваемой системы перемещений с шестью степенями свободы может быть выполнено в среде MATLAB/Simulink в соответствии с концепцией моделирования пакета Simscape. Динамическая модель системы реализуется в виде блочно-схемного описания механической структуры с помощью соответствующих функциональных элементов. В процессе моделирования автоматически осуществляется преобразование описания механической структуры физического объекта во внутреннюю эквивалентную математическую модель, построенную на основе уравнений Ньютона-Эйлера. Это значительно упрощает построение и реализацию динамической модели, не требуя непосредственного использования целого ряда дифференциальных уравнений, описывающих механические компоненты системы.

Поддержка интеграции с CAD (Computer-Aided Design) платформами, такими как Autodesk Inventor и SolidWorks, позволяет автоматически импортировать структурно-параметрическое описание модели системы в среду MATLAB/Simulink.

Моделирование управления

Для реализации управления системой перемещений в режиме реального времени на базе инструментария MATLAB Real-Time Workshop создана интерактивная программа управления. В основу создания интерактивного программного обеспечения легли подход быстрого макетирования (Rapid Control Prototyping) и dSPACE система RTI1003 4.3. Интерактивная программа управления, интерфейс которой показан на рис. 11, была реализована на базе ControlDesk и интерфейса mlib.

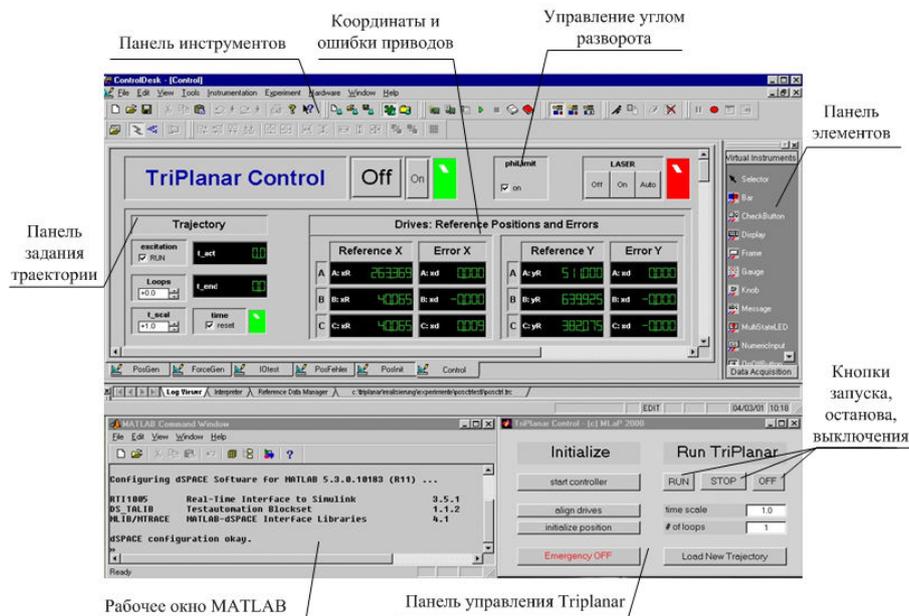


Рис. 11. Интерфейс программы управления

Интерактивная программа управления верхнего уровня формирует управляющие параметры в виде шести координат центра рабочей платформы. Для построения шестикоординатного вектора положения платформы в MATLAB была разработана функция *plat_posit_has.m*, позволяющая формировать задание на перемещение для платформы. Реализация этой функции базируется на методах голономных автоматических систем [6]. После ввода пользователем входных параметров движения (траектория, скорость, ускорение) осуществляется цикл расчетов, результатом которых является семимерный массив, включающий шесть координат, три линейных и три угловых положения платформы и время. Укрупненная вычислительная структура формирования задания на перемещение представлена на рис. 12. Разработанная траекторная функция позволяет формировать массивы точек с задаваемой дискретностью до 0,05 мкм. Примеры реализации результатов вычислений функции *plat_posit_has.m* в виде кривых на сфере представлены на рис. 13. Разработан алгоритм параметризации программируемых пространственных перемещений по заданной кривой, на основании которого выполнены решения дифференциальных систем траекторного состояния, позволяющие определять управляющие функции. Разработано программное обеспечение в среде MATLAB для моделирования управления системой перемещений на трех планарных позиционерах с интерактивной визуализацией результатов в реальном режиме времени. Для тестовой визуализации пространственных перемещений как рабочей платформы, так и системы перемещений в соответствии с полученными результатами моделирования в среде MATLAB была разработана программа интерактивной визуализации выполняемых перемещений в режиме реального времени. Интерфейс программы содержит окна задания координат, кнопки трассировки, сохранения результатов в файл, а также запуска моделирования в среде MATLAB. Также в интерфейсном окне программы визуализации выполняется в реальном масштабе времени анимационное отображение системы перемещений и полученных траекторий перемещений планарных позиционеров. Разработанное программное обеспечение управления системой перемещений основано на параметризации сегментированных алгоритмов решения задач кинематики.

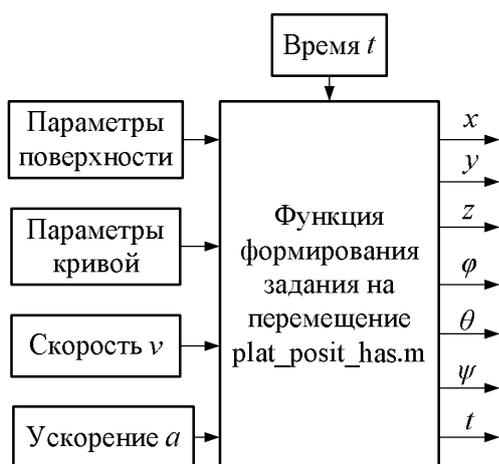


Рис. 12. Укрупненная вычислительная структура

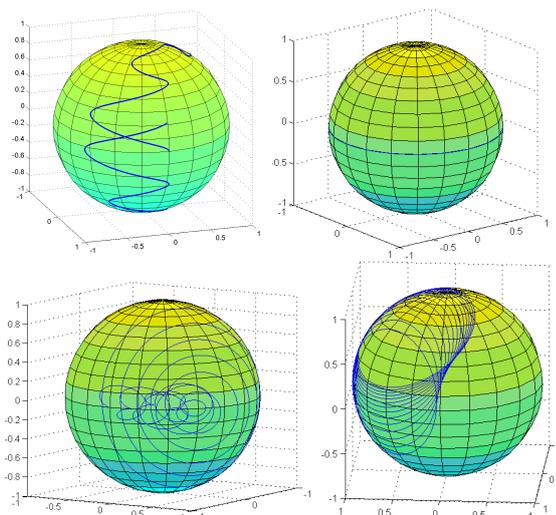


Рис. 13. Результаты траекторных вычислений

Заключение

В статье представлены результаты исследований, полученные в совместной с ГНПО «Планар» учебно-научной лаборатории «Математическое моделирование технических систем и информационных технологий» и НИГ.3.2 «Мехатроника и микросистемы», по дальнейшему развитию концепции построения прецизионных систем перемещений как мехатронных систем параллельной кинематики, реконфигурируемых в зависимости от гибридного многокоординатного привода прямого действия. На основании предложенного подхода к структурному синтезу разработано свыше десяти систем многокоординатных перемещений с числом степеней свободы от 3 до 6 и возможностью управления движением инструмента или заготовки по трем линейным и трем угловым независимым координатам в трехмерном пространстве. Новые технические решения по системам перемещений и гибридным многокоординатным приводам прямого действия защищены патентами Республики Беларусь.

Список литературы

1. Системы многокоординатных перемещений на механизмах параллельной кинематики / С.Е. Карпович [и др.]. Минск: Бестпринт, 2017. 254 с.
2. Моделирование механизмов параллельной кинематики в среде MATLAB/Simulink / С.Е. Карпович [и др.]. Минск: Бестпринт, 2013. 254 с.
3. Системы многокоординатных перемещений и исполнительные механизмы для прецизионного технологического оборудования / С.Е. Карпович [и др.]. Минск: Бестпринт, 2013. 208 с.
4. Карпович С.Е., Дайняк И.В., Жарский В.В. Программируемые движения в прецизионных системах перемещений. Минск: Бестпринт, 2008. 206 с.
5. Жарский В.В., Карпович С.Е., Дайняк И.В. Привод прямого действия для мотор-колес мобильных систем. Минск: Бестпринт, 2009. 175 с.
6. Карпович С.Е., Жарский В.В., Дайняк И.В. Имитационное моделирование голономных и мобильных автоматических систем. Минск: Бестпринт, 2008. 212 с.
7. Аналитическая механика и мехатронные системы перемещений / С.Е. Карпович [и др.]. Минск: Технопринт, 2004. 187 с.
8. Численные методы решения задач на ПЭВМ: в 2 ч. / С.Е. Карпович [и др.]. Ч. 1: Минск: Бестпринт, 2004. 150 с. Ч. 2: Минск: Бестпринт, 2005. 236 с.
9. Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники / А.П. Достанко [и др.]. Т. 3. Минск: Бестпринт, 2001. 290 с.
10. Электрофизические процессы и оборудование в технологии микро- и нанoeлектроники / А.П. Достанко [и др.]. Минск: Бестпринт, 2011. 216 с.

11. Механизм шагового перемещени: пат. 6986 Респ. Беларусь / С.Е. Карпович, Ю.С. Межинский, А.В. Стреха, И.В. Дайняк, Д.А. Степанов; дата публ.: 30.06.2005.
12. Способ микрошагового управления шаговым двигателем и устройство для его осуществления: пат. 7005 Респ. Беларусь / С.Е. Карпович, С.В. Ковалев, И.А. Павлюковский, Ю.С. Межинский, И.В. Дайняк; дата публ.: 30.06.2005.
13. Шаговый двигатель: пат. 9728 Респ. Беларусь / С.Е. Карпович, И.В. Дайняк, В.В. Поляковский, Е.А. Литвинов, В.В. Жарский, Д.Г. Бегун, Н.И. Кекиш, Е.А. Титко, Д.С. Титко; дата публ.: 30.03.2003.
14. Многокоординатный синхронный электродвигатель: пат. 18732 Респ. Беларусь / С.Е. Карпович, Е.А. Литвинов, В.В. Жарский; дата публ.: 30.12.2014.
15. Манипулятор с шестью степенями свободы на кольцевом сегментном двигателе: пат. 20222 Респ. Беларусь / С.Е. Карпович, Е.А. Литвинов, М.А. Ареби; дата публ.: 30.08.2016.
16. Манипулятор параллельной кинематики для реализации прецизионных движений с шестью степенями свободы: пат. 6657 Респ. Беларусь / С.Е. Карпович, Е.А. Литвинов; дата публ.: 30.12.2004.
17. Электродвигатель мотор-колеса: пат. 21634 Респ. Беларусь / С.Е. Карпович, И.В. Дайняк, В.В. Жарский, В.В. Поляковский, Д.С. Титко; дата публ.: 28.02.2018.
18. Механизм параллельной кинематики с тремя степенями свободы: пат. 11671 Респ. Беларусь / С.Е. Карпович, И.В. Дайняк, В.В. Кузнецов, А.Ю. Войтов, М.М. Форутан; дата публ.: 30.04.2018.
19. Линейный шаговый многокоординатный двигатель: пат. 2956 Респ. Беларусь / В.В. Жарский, С.Е. Карпович, С.Н. Сидорук; дат. публ.: 15.09.1999.
20. Синхронный стержневой мотор: пат. 4760 Респ. Беларусь / В.В. Жарский, В.И. Лазовский, А.И. Михалев, Н.К. Трусов; дата публ.: 30.12.2002.
21. Механизм параллельной кинематики с шестью степенями свободы: пат. Респ. Беларусь / С.Е. Карпович, В.В. Кузнецов, А.Ф. Марко, К.В. Чеушев, В.Н. Нестеренко, Д.С. Титко; дата публ.: 20.12.2018.
22. Математическая модель и алгоритмизация прямой задачи кинематики параллельного манипулятора с шестью степенями свободы / С.Е. Карпович [и др.] // ТиПМ. 2018. Вып. 33. С. 137–143.
23. Карпович С.Е., Салманзадех Г.Й., Жарский В.В. Системы многокоординатных перемещений на механизмах параллельной кинематики // ТиПМ. 2018. Вып. 33. С. 18–22.
24. Кузнецов В.В. Имитационное моделирование динамики параллельного манипулятора на трех планарных позиционерах // ТиПМ. Вып. 33. 2018. С. 287–294.
25. Дайняк И.В., Кузнецов В.В., Поляковский В.В. Управление мехатронными системами перемещений в режиме реального времени ТиПМ. 2018. Вып. 33. С. 86–91.
26. Kuzniatsou V. Computer modeling of kinematics and dynamics of parallel manipulator with six degrees of freedom // Present Day Trends of Innovations 7. Zilina, 2017. P. 65–73.
27. Construction of the equations of a motion of coordinate system of the robot on the nonholonomic program / S. Karpovich [et al.] // Present Day Trends of Innovations 7. Zilina, 2017. P. 135–143.
28. Кузнецов В.В., Поляковский В.В. Интерактивное управление мехатронной системой перемещений на трех планарных позиционерах // ТиПМ. 2017. Вып. 32. С. 283–292.
29. Кузнецов В.В., Титко Д.С., Бегун Д.Г. Динамическая модель механизма параллельной кинематики с шестью степенями свободы в среде matlab // ТиПМ. Вып. 32. 2017. С. 170–175.
30. Кузнецов В.В. Алгоритмизация и моделирование пространственной системы параллельной кинематики на трех планарных позиционерах // Изв. Нац. акад. наук Беларуси. 2017. №. 3. С. 309–318.
31. Program motion planning and control for multicoordinate mechanical system / S. Karpovich [et al.]. // Актуальные вопросы машиноведения. 2016. Вып. 5. С. 25–30.
32. Карпович С.Е., Кузнецов В.В. // Алгоритмизация обратной задачи кинематики параллельного манипулятора на шестикоординатном линейном шаговом двигателе. Актуальные вопросы машиноведения. 2016. Вып. 5. С. 64–68.
33. Кузнецов В.В., Войтов А.Ю. Кинематика системы перемещений с шестью степенями свободы // Аспирант. 2016. № 1. С. 74–78.
34. Investigation of static and dynamic systems in the maple environment / S. Karpovich [et al.]. Lomza, 2016. P. 36–47.
35. Karpovich S., Kuzniatsou V. Simulation of control system of the 6-dof spatial parallel mechanism. Lomza, 2016. P. 83–94.
36. Algorithmization of control functions for realizing of motion program of mechanical system / S. Karpovich [et al.]. Lomza, 2016. P. 63–75.
37. Карпович С.Е., Кузнецов В.В., Форутан М.М. Имитационное моделирование кинематики системы перемещений с интерактивной визуализацией результатов // Докл. БГУИР. 2016. №. 3. С. 22–28.

References

1. Sistemy mnogokoordinatnyh peremeshhenij na mehanizmah parallel'noj kinematiki / S.E. Karpovich [i dr.]. Minsk: Bestprint, 2017. 254 s. (in Russ.)

2. Modelirovanie mehanizmov parallel'noj kinematiki v srede MATLAB/Simulink / S.E. Karpovich [i dr.]. Minsk: Bestprint, 2013. 254 s. (in Russ.)
3. Sistemy mnogokoordinatnyh peremeshhenij i ispolnitel'nye mehanizmy dlja precizionnogo tehnologicheskogo oborudovanija / S.E. Karpovich [i dr.]. Minsk: Bestprint, 2013. 208 s. (in Russ.)
4. Karpovich S.E., Dajnjak I.V., Zharskij V.V. Programmiruemye dvizhenija v precizionnyh sistemah peremeshhenij. Minsk: Bestprint, 2008. 206 s. (in Russ.)
5. Zharskij V.V., Karpovich S.E., Dajnjak I.V. Privod prjamogo dejstvija dlja motor-koles mobil'nyh sistem. Minsk: Bestprint, 2009. 175 s. (in Russ.)
6. Karpovich S.E., Zharskij V.V., Dajnjak I.V. Imitacionnoe modelirovanie golonomnyh i mobil'nyh avtomaticheskikh sistem. Minsk: Bestprint, 2008. 212 s. (in Russ.)
7. Analiticheskaja mehanika i mehatronnye sistemy peremeshhenij / S.E. Karpovich [i dr.]. Minsk: Tehnoprnt, 2004. 187 s. (in Russ.)
8. Chislennye metody reshenija zadach na PJeVM: v 2 ch. / S.E. Karpovich [i dr.]. Ch. 1: Minsk: Bestprint, 2004. 150 s. Ch. 2: Minsk: Bestprint, 2005. 236 s. (in Russ.)
9. Plazmennye processy v proizvodstve izdelij jelektronnoj tehniki / A.P. Dostanko [i dr.]. T. 3. Minsk: Bestprint, 2001. 290 s. (in Russ.)
10. Jelektrofizicheskie processy i oborudovanie v tehnologii mikro- i nanojelektroniki / A.P. Dostanko [i dr.]. Minsk: Bestprint, 2011. 216 s. (in Russ.)
11. Mehanizm shagovogo peremeshheni: pat. 6986 Resp. Belarus' / S.E. Karpovich, Ju.S. Mezhinskij, A.V. Streha, I.V. Dajnjak, D.A. Stepanov; data publ.: 30.06.2005. (in Russ.)
12. Sposob mikroshagovogo upravlenija shagovym dvigatelem i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija: pat. 7005 Resp. Belarus' / S.E. Karpovich, S.V. Kovalev, I.A. Pavljukovskij, Ju.S. Mezhinskij, I.V. Dajnjak; data publ.: 30.06.2005. (in Russ.)
13. Shagovyj dvigatel': pat. 9728 Resp. Belarus' / S.E. Karpovich, I.V. Dajnjak, V.V. Poljakovskij, E.A. Litvinov, V.V. Zharskij, D.G. Begun, N.I. Kekish, E.A. Titko, D.S. Titko; data publ.: 30.03.2003. (in Russ.)
14. Mnogokoordinatnyj sinhronnyj jelektrodvigateľ: pat. 18732 Resp. Belarus' / S.E. Karpovich, E.A. Litvinov, V.V. Zharskij; data publ.: 30.12.2014. (in Russ.)
15. Manipuljator s šest'ju stepenjami svobody na kol'cevom segmentnom dvigatele: pat. 20222 Resp. Belarus' / S.E. Karpovich, E.A. Litvinov, M.A. Arebi; data publ.: 30.08.2016. (in Russ.)
16. Manipuljator parallel'noj kinematiki dlja realizacii precizionnyh dvizhenij s šest'ju stepenjami svobody: pat. 6657 Resp. Belarus' / S.E. Karpovich, E.A. Litvinov; data publ.: 30.12.2004. (in Russ.)
17. Jelektrodvigateľ motor-kolesa: pat. 21634 Resp. Belarus' / S.E. Karpovich, I.V. Dajnjak, V.V. Zharskij, V.V. Poljakovskij, D.S. Titko; data publ.: 28.02.2018. (in Russ.)
18. Mehanizm parallel'noj kinematiki s tremja stepenjami svobody: pat. 11671 Resp. Belarus' / S.E. Karpovich, I.V. Dajnjak, V.V. Kuznecov, A.Ju. Vojtov, M.M. Forutan; data publ.: 30.04.2018. (in Russ.)
19. Linejnyj shagovyj mnogokoordinatnyj dvigatel': pat. 2956 Resp. Belarus' / V.V. Zharskij, S.E. Karpovich, S.N. Sidoruk; dat. publ.: 15.09.1999. (in Russ.)
20. Sinhronnyj sterzhnevoj motor: pat. 4760 Resp. Belarus' / V.V. Zharskij, V.I. Lazovskij, A.I. Mihalev, N.K. Trusov; data publ.: 30.12.2002. (in Russ.)
21. Mehanizm parallel'noj kinematiki s šest'ju stepenjami svobody: pat. Resp. Belarus' / S.E. Karpovich, V.V. Kuznecov, A.F. Marko, K.V. Cheushev, V.N. Nesterenko, D.S. Titko; data publ.: 20.12.2018. (in Russ.)
22. Matematicheskaja model' i algoritimizacija prjamoj zadachi kinematiki parallel'nogo manipuljatora s šest'ju stepenjami svobody / S.E. Karpovich [i dr.] // TiPM. 2018. Vyp. 33. S. 137–143. (in Russ.)
23. Karpovich S.E., Salmanzadeh G.J., Zharskij V.V. Sistemy mnogokoordinatnyh peremeshhenij na mehanizmah parparallel'noj kinematiki // TiPM. 2018. Vyp. 33. S. 18–22. (in Russ.)
24. Kuznecov V.V. Imitacionnoe modelirovanie dinamiki parallel'nogo manipuljatora na treh planarnyh pozicionerah // TiPM. Vyp. 33. 2018. S. 287–294. (in Russ.)
25. Dajnjak I.V., Kuznecov V.V., Poljakovskij V.V. Upravlenie mehatronnymi sistemami peremeshhenij v rezhime real'nogo vremeni TiPM. 2018. Vyp. 33. S. 86–91. (in Russ.)
26. Kuzniatsou V. Computer modeling of kinematics and dynamics of parallel manipulator with six degrees of freedom // Present Day Trends of Innovations 7. Zilina, 2017. P. 65–73.
27. Construction of the equations of a motion of coordinate system of the robot on the nonholonomic program / S. Karpovich [et al.] // Present Day Trends of Innovations 7. Zilina, 2017. P. 135–143.
28. Kuznecov V.V., Poljakovskij V.V. Interaktivnoe upravlenie mehatronnoj sistemoj peremeshhenij na treh planarnyh pozicionerah // TiPM. 2017. Vyp. 32. S. 283–292. (in Russ.)
29. Kuznecov V.V., Titko D.S., Begun D.G. Dinamicheskaja model' mehanizma parallel'noj kinematiki s šest'ju stepenjami svobody v srede matlab // TiPM. Vyp. 32. 2017. S. 170–175. (in Russ.)
30. Kuznecov V.V. Algoritmizacija i modelirovanie prostranstvennoj sistemy parallel'noj kinematiki na treh planarnyh pozicionerah // Izv. Nac. akad. nauk Belarusi. 2017. №. 3. S. 309–318. (in Russ.)

31. Program motion planning and control for multicoordinate mechanical system / S. Karpovich [et al.]. // Aktual'nye voprosy mashinovedeniya. 2016. Vyp. 5. S. 25–30. (in Russ.)
32. Karpovich S.E., Kuznecov V.V. // Algoritmizacija obratnoj zadachi kinematiki parallel'nogo manipuljatora na shestikoordinatnom linejnom shagovom dvigatele. Aktual'nye voprosy mashinovedeniya. 2016. Vyp. 5. S. 64–68. (in Russ.)
33. Kuznecov V.V., Vojtov A.Ju. Kinematika sistemy peremeshhenij s shest'ju stepenjami svobody // Aspirant. 2016. № 1. S. 74–78. (in Russ.)
34. Investigation of static and dynamic systems in the maple environment / S. Karpovich [et al.]. Lomza, 2016. P 36–47.
35. Karpovich S., Kuzniatsou V. Simulation of control system of the 6-dof spatial parallel mechanism. Lomza, 2016. P. 83–94.
36. Algorithmization of control functions for realizing of motion program of mechanical system / S. Karpovich [et al.]. Lomza, 2016. P. 63–75.
37. Karpovich S.E., Kuznecov V.V., Forutan M.M. Imitacionnoe modelirovanie kinematiki sistemy peremeshhenij s interaktivnoj vizualizaciej rezul'tatov // Dokl. BGUIR. 2016. №. 3. S. 22–28. (in Russ.)

Сведения об авторах

Карпович С.Е., д.т.н., профессор, лауреат Государственной премии Республики Беларусь, профессор кафедры высшей математики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Дайняк И.В., к.т.н., доцент, доцент кафедры высшей математики Белорусского государственного университета.

Кузнецов В.В., магистрант кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220040, Республика Беларусь
г. Минск, ул. Гикало, 9
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-29-672-14-86;
e-mail: mmmts@bsuir.by
Карпович Святослав Евгеньевич

Information about the authors

Karpovich S.E., D.Sci, professor, winner of the state prize of the Republic of Belarus, professor of high mathematics department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Dainiak I.V., PhD, associate professor, associate professor of high mathematics department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Kuzniatsou V.V., master student of engineering psychology and ergonomics department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Address for correspondence

220040, Republic of Belarus
Minsk, Hicaly st., 9
Belarusian state university
of informatics and radioelectronics
tel. +375-29-672-14-86;
e-mail: mmmts@bsuir.by
Karpovich Sviataslau Eugenievich

УДК 538.91

АТОМАРНАЯ СТРУКТУРА, ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ, ОПТИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА НИЗКОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР ИЗ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

В.Е. БОРИСЕНКО, А.В. КРИВОШЕЕВА, Д.Б. МИГАС,
В.А. ПУШКАРЧУК, А.Б. ФИЛОНОВ, В.Л. ШАПОШНИКОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 11 февраля 2019

Аннотация. Обобщены результаты теоретического моделирования из первых принципов атомарной структуры и свойств перспективных низкоразмерных структур из полупроводников, выполненного в Центре наноэлектроники и новых материалов Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники за последние пять лет. Приведены основные обнаруженные новые свойства двумерных структур из дихалькогенидов тугоплавких металлов и полупроводниковых силицидов, одномерных структур из кремния, полупроводников A^3B^5 и полупроводниковых оксидов металлов, нульмерных структур из углерода – наноалмазов.

Ключевые слова: низкоразмерная структура, двумерный кристалл, квантовая пленка, квантовый шнур, дихалькогенид, силицид, оксид, A^3B^5 , кремний, наноалмаз.

Abstract. The results of theoretical modeling from the first principles of atomic structure and properties of promising low-dimensional structures from semiconductors, performed for the past five years at the Center of Nanoelectronics and Novel Materials of Belarusian state university of informatics and radioelectronics, are summarized. The discovered principal new properties of two-dimensional structures from dichalcogenides of refractory metals and semiconductor silicides, one-dimensional structures of silicon, A^3B^5 semiconductors and semiconductor metal oxides, and zero-dimensional structures of carbon – nanodiamonds – are presented.

Keywords: low-dimensional structure, two-dimensional crystal, quantum film, quantum wire, dichalcogenide, silicide, oxide, A_3B_5 , silicon, nanodiamond.

Doklady BGUIR. 2019, Vol. 120, No. 2, pp. 73-84

**Atomic structure, fundamental electronic, optical
and magnetic properties of low-dimensional structures of semiconductors**

V.E. Borisenko, A.V. Krivosheeva, D.B. Migas,

V.A. Pushkarchuk, A.B. Filonov, V.L. Shaposhnikov

Введение

В современном мире идет стремительное развитие и совершенствование электронных устройств, размеры которых должны постоянно уменьшаться, а производительность повышаться. Наноэлектроника [1] и спинтроника [2] сегодня вышли на передовые рубежи развития и практического освоения в техническом обеспечении информационных технологий. Основной прогресс в них достигается использованием нанотехнологий и формируемых с их помощью низкоразмерных структур [3], свойства которых определяются поверхностью и влиянием квантовых эффектов, что выгодно отличает их от свойств объемных материалов. Эффекты, связанные с низкой размерностью, проявляются при геометрических размерах структурных элементов в нанометровом диапазоне, типично от 1 до 100 нм.

Наряду с уменьшением размеров структурных элементов электронных и оптических информационных систем значительные перспективы представляет и поиск новых

полупроводниковых материалов, низкоразмерные структуры из которых по своим свойствам превзошли бы аналоги из традиционно используемых кремния и полупроводниковых соединений A^3B^5 . Решению этой комплексной задачи и посвящены теоретические исследования, выполняемые в Центре наноэлектроники и новых материалов Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. Их основные результаты обобщены в данном обзоре.

Методика теоретического исследования низкоразмерных структур из полупроводников

Для получения новых сведений об основном состоянии и свойствах материалов и низкоразмерных структур из них, не прибегая к дорогостоящим и трудоемким экспериментальным исследованиям, авторами было проведено их моделирование первопринципными методами, в основе которых лежит теория функционала электронной плотности. Их достоинством является использование в качестве первичной информации данных только о предполагаемой кристаллической структуре и типах атомов в исследуемом твердом теле и отсутствие каких-либо подгоночных параметров.

Используемая авторами схема расчетов включает следующие основные этапы [4]: 1) выбор типа кристаллической решетки, характерной для идеальной объемной структуры исследуемого материала, и задание первичных координат атомов в ней; 2) оптимизация расположения атомов в идеальной кристаллической решетке минимизацией сил, действующих на каждый атом; 3) выделение из объемного материала исследуемой низкоразмерной структуры, введение в ее объем и на поверхность примесных атомов и/или вакансий и определение новых координат атомов с учетом присутствия этих точечных дефектов; 4) расчет фундаментальных электронных свойств (энергетические электронные зоны, плотность электронных состояний) в исследуемой структуре; 5) расчет оптических, магнитных и транспортных свойств из полученных фундаментальных электронных свойств.

Численные расчеты для двумерных и одномерных структур проводятся с использованием пакета VASP (Vienna *ab initio* simulation package), реализующего метод псевдопотенциала и пакета WIEN2K, реализующего метод линейаризованных присоединенных плоских волн (ЛППВ) с полным потенциалом. Для моделирования нульмерных структур используются специальные кластерные пакеты GAMESS и ORCA. Они, как показало сравнение результатов расчета с имеющимися экспериментальными данными, обеспечивают наилучшее сочетание точности расчетов и временных затрат на их проведение.

Двумерные структуры – квантовые пленки и слои, двумерные кристаллы

Двумерными, с точки зрения фундаментальных электронных свойств, называют структуры, в которых квантовое ограничение носителей заряда действует только в одном направлении, а именно по толщине пленки, слоя, кристалла [1]. Такого рода структуры были исследованы авторами на примере таких перспективных полупроводников, как дихалькогениды тугоплавких металлов и силициды.

Дихалькогениды тугоплавких металлов. Дихалькогениды тугоплавких металлов представляют собой неорганические соединения со слоистой гексагональной кристаллической структурой, каждый слой в которой состоит из чередующихся плоскостей: атом халькогена – атом металла – атом халькогена (S(Se)–Mo(W)–S(Se)). В решетке таких соединений существуют два различных типа связи: ковалентная межатомная связь и ван-дер-ваальсовы связи между слоями. Авторами были исследованы объемные MoS_2 , $MoSe_2$, WS_2 и WSe_2 , отдельные нанометровые слои из них и гетероструктуры на их основе при наличии в них вакансий и примесей [5–18].

Установлено, что в объемном состоянии все указанные материалы являются непрямозонными полупроводниками. Уменьшение их толщины до одного мономолекулярного слоя (монослоя), что соответствует их двумерному состоянию, приводит к тому, что сульфиды становятся прямозонными полупроводниками с шириной запрещенной зоны $E_g = 1,84$ эВ (MoS_2) и $E_g = 1,97$ эВ (WS_2), при этом прямой переход расположен в точке К гексагональной

зоны Бриллюэна. Селениды MoSe_2 и WSe_2 остаются непрямозонными полупроводниками с $E_g = 1,60$ эВ и $E_g = 1,66$ эВ соответственно.

Расчет диэлектрической функции для объемных и однослойных халькогенидов показал сильную анизотропию оптических спектров вдоль двух рассмотренных направлений поляризации света. В рассмотренных объемных соединениях первый прямой переход имеет низкую силу осцилляторов, и его вероятность невысока. В случае монослоев дисульфидов молибдена и вольфрама, обладающих первым прямым переходом в точке К, этот переход имеет значительную силу осцилляторов. Таким образом, можно заключить, что монослои из MoS_2 и WS_2 можно использовать в светоизлучающих приборах, работающих в красной области видимого спектра. Для непрямозонных однослойных диселенидов перспективы создания светоизлучающих диодов на их основе менее вероятны [5, 10].

Исследовано влияние примеси кислорода и наличия вакансий по атому халькогена на электронную структуру названных выше дихалькогенидов [7, 8, 16]. Зависимости изменения ширины запрещенной зоны в 2D-дихалькогенидах при наличии в их структуре вакансий и атомов кислорода представлены на рис. 1.

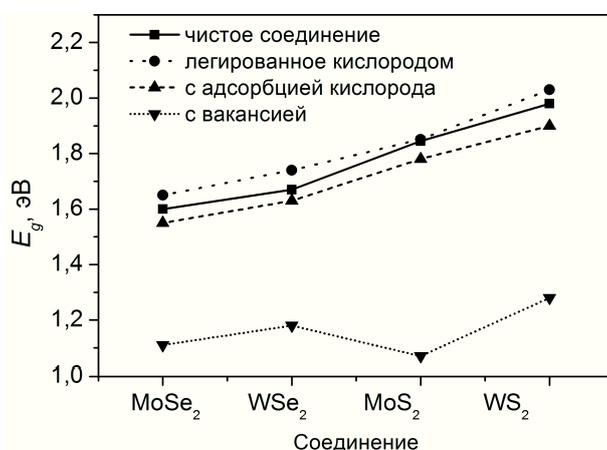


Рис. 1. Ширина запрещенной зоны (E_g) исследованных дихалькогенидов при наличии в материале вакансий и атомов кислорода [16]

Проведенные расчеты электронных зонных структур MoS_2 при замещении атомов серы атомами теллура вплоть до образования MoTe_2 показали, что полупроводниковый характер соединений не изменяется [9, 11, 15, 18].

Представленная на рис. 2 закономерность изменения E_g в соединениях $\text{MoS}_{2-x}\text{Te}_x$ демонстрирует, что при $x = 0-1$ ширина запрещенной зоны линейно зависит от концентрации атомов Те. При преобладании концентрации атомов теллура над концентрацией атомов серы зависимость имеет нелинейный характер вследствие различного расположения экстремумов энергетических зон.

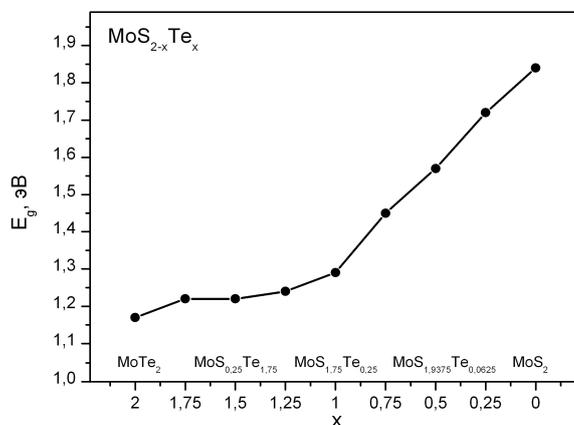


Рис. 2. Зависимость ширины запрещенной зоны (E_g) от концентрации атомов теллура (x) в соединении $\text{MoS}_{2-x}\text{Te}_x$ [9]

Влияние дефектов на свойства гетероструктур исследовалось на примере различного сочетания слоев двумерных кристаллов MoS_2 , WS_2 , WSe_2 и MoSe_2 , при этом атомы слоев располагались либо с соблюдением зеркальной симметрии относительно плоскости слоев, либо со смещением друг относительно друга по аналогии с объемным материалом [16]. Было установлено, что расстояния между атомами металла и халькогена существенно увеличиваются в слоях, содержащих атомы селена, по сравнению со слоями, содержащими атомы серы, в то время как варьирование атомов металла практически не изменяет межатомные расстояния. Замещение атома халькогена атомом теллура увеличивает расстояние до атомов металла и до атомов халькогена [15, 18].

Анализ различий в электронных зонных структурах в зависимости от места расположения в них примеси и вакансий показал, что в случае замещения атомов халькогена атомами теллура все структуры становятся непрямозонными полупроводниками. Присутствие примеси приводит к снятию вырождения и расщеплению энергетических уровней в зоне проводимости, а также к сдвигу экстремумов зон и уменьшению ширины запрещенной зоны.

В случае присутствия в структуре одновременно атома примеси и вакансии ряд структур становится прямозонными полупроводниками, при этом ширина запрещенной зоны уменьшается по сравнению с бездефектной структурой [15, 18].

Еще один вариант модификации свойств предполагает внедрение магнитных примесей в немагнитные полупроводники. Авторами рассмотрена возможность возникновения магнитного упорядочения в гетероструктурах из монослоев дихалькогенидов молибдена и вольфрама, легированных атомами марганца, при этом проанализированы локальные и полные магнитные моменты при расположении двух атомов примеси в нижнем слое, верхнем слое; либо когда один из атомов примеси находится в нижнем, а второй – в верхнем слоях гетероструктуры [17]. Выявлено, что магнитный момент на атоме марганца максимален, когда примесь находится в двух различных слоях, в то время как взаимное расположение слоев относительно друг друга оказывает существенное влияние на величину магнитного момента преимущественно при положении атомов примеси либо в верхнем, либо в нижнем слое гетероструктуры. Так, когда атомы примеси находятся в верхнем слое, магнитный момент при зеркальном расположении слоев имеет большее значение в антиферромагнитной конфигурации, тогда как при смещенном расположении слоев магнитный момент существенно выше у системы в ферромагнитном состоянии. Нахождение атомов примеси в нижнем слое приводит к изменению величины его магнитного момента в зависимости от взаимного расположения слоев, однако в целом тенденция изменения значения магнитного момента при разном взаимном расположении слоев сохраняется.

Расчет спин-зависимых электронных зонных спектров двумерных гетероструктур $\text{MoS}_2/\text{MoSe}_2$, MoS_2/WS_2 , WS_2/WSe_2 , $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$ с атомами марганца в позициях атомов молибдена и вольфрама, когда атомы Mn расположены в нижнем и в верхнем слоях, показал, что в случае зеркального расположения слоев структура WS_2/WSe_2 проявляет металлические свойства, тогда как остальные три варианта – $\text{MoS}_2/\text{MoSe}_2$, MoS_2/S_2 и $\text{MoSe}_2/\text{Se}_2$ – проявляют полуметаллический характер. В случае расположения слоев со смещением все рассмотренные гетероструктуры являются полуметаллами [17]. Когда в качестве замещающей примеси были взяты атомы марганца на месте атомов молибдена и вольфрама в гетероструктурах $\text{MoS}_2/\text{MoSe}_2$, MoS_2/WS_2 , WS_2/WSe_2 , $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$, при этом один атом примеси находился в верхнем, а другой – в нижнем слое, практически во всех случаях, за исключением зеркального расположения слоев WS_2/WSe_2 , имеет место стопроцентная спиновая поляризация, то есть преимущественное большинство рассмотренных комбинаций являются полуметаллами в ферромагнитном состоянии, которое, из анализа полной энергии систем, является для них энергетически выгодным.

Установленные электронные, оптические и магнитные свойства исследованных двумерных дихалькогенидов тугоплавких металлов позволили выработать рекомендации по их практическому использованию в новых элементах обработки информации [19].

Полупроводниковые силициды. Среди соединений, образуемых металлами и кремнием, называемых силицидами, лишь немногим более десятка обладают полупроводниковыми свойствами в объемном состоянии [20]. Авторами впервые проведен теоретический анализ

двумерных слоев из Mg_2Si , Ca_2Si , Sr_2Si , Ba_2Si , $BaSi_2$, $CaSi_2$, которые перспективны для оптоэлектронных и термоэлектрических применений.

Установлено, что объемные полупроводниковые Ca_2Si , Sr_2Si и Ba_2Si с орторомбической структурой в случае пленочных систем, содержащих несколько атомарных монослоев, меняют свою структуру на гексагональную, которая характерна для двумерных халькогенидов переходных металлов. Объемный полупроводниковый Mg_2Si с кубической структурой в направлении $\langle 111 \rangle$ также формирует слоистую структуру, как и у халькогенидов переходных металлов. Такое изменение структуры оказалось энергетически выгодным из-за влияния эффекта псевдопассивации: атомы металла образуют поверхностные слои, расположенные параллельно друг другу, между которыми располагаются атомы Si, а значительное перераспределение заряда между атомами «виртуально» приводит к исчезновению оборванных связей у атомов металла на поверхности и не требует проведения дополнительной пассивации [21].

Проведенные расчеты энергетических электронных зон в объемных и двумерных Mg_2Si , Ca_2Si , Sr_2Si и Ba_2Si [21], результаты которых представлены на рис. 3, показали, что понижение размерности структур из этих материалов до двумерного состояния приводит к тому, что Mg_2Si становится прямым полупроводником с шириной запрещенной зоны 1,14 эВ, а Ca_2Si , Sr_2Si и Ba_2Si – квазипрямыми с шириной запрещенной зоны 0,69 эВ, 0,33 эВ и 0,19 эВ соответственно. Анализ перераспределения заряда между атомами показывает, что атомы металла отдают около $1,49e^-$, $1,39e^-$, $1,27e^-$ и $1,12e^-$, а атомы кремния принимают около $2,98e^-$, $2,78e^-$, $2,54e^-$, $2,24e^-$ соответственно для Mg_2Si , Ca_2Si , Sr_2Si и Ba_2Si , что указывает на значительную ионную составляющую химической связи. Существенной разницы в перераспределении зарядов между названными объемными материалами и двумерными структурами из них не обнаружено.

Исследованы свойства тонких пленок полупроводникового $BaSi_2$ [22] с различной ориентацией. Установлено, что наименьшим значением поверхностной энергии, вследствие эффекта псевдопассивации, обладают пленки $BaSi_2$ с атомами бария на поверхности. Также выявлены энергетические положения поверхностных состояний в районе запрещенной зоны. Оценены значения подвижностей носителей заряда в пленках $BaSi_2$, которые при комнатной температуре оказались равными $\sim 800 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ для электронов и $\sim 200 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ для дырок [23], что является наивысшими показателями для данного класса материалов. В случае тонких пленок $CaSi_2$ анализ энергетического спектра и зависимостей коэффициента оптического поглощения от энергии фотонов показал, что данный материал является прозрачным в инфракрасном диапазоне проводником [24].

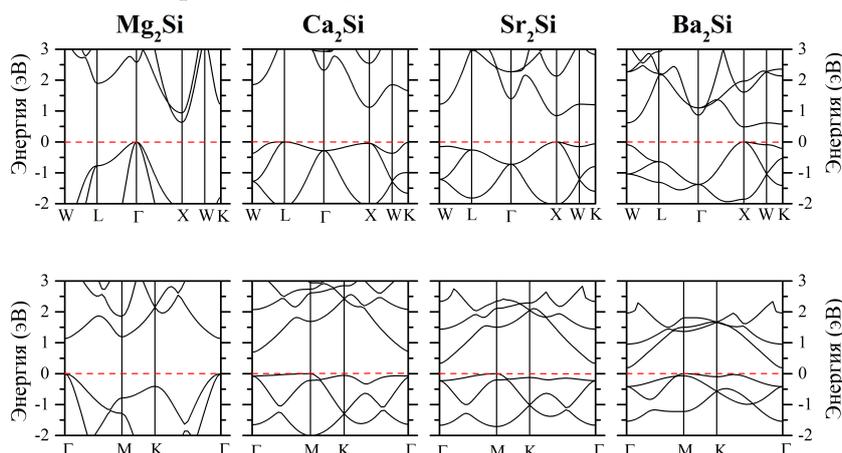


Рис. 3. Энергетические спектры объемных (верхняя панель) и 2D-структур (нижняя панель) Mg_2Si , Ca_2Si , Sr_2Si и Ba_2Si . Ноль на шкале энергий соответствует потолку валентной зоны [21]

Одномерные структуры – квантовые шнуры

В одномерных структурах квантовое ограничение действует в двух взаимно перпендикулярных направлениях, что, наряду с малыми (нанометровыми) размерами поперечного

сечения шнуров, делает актуальным анализ влияния структурных перестроек и атомарных конфигураций на боковых гранях на их свойства. Это влияние было исследовано для шнуров из полупроводниковых соединений A^3B^5 , кремния, германия, полупроводникового диоксида титана TiO_2 и силицида кальция Ca_2Si . Экспериментально наблюдаемое поперечное сечение $\langle 111 \rangle$ -ориентированных A^3B^5 (GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs и InSb) нанощнуров имеет форму шестигранника с $\{011\}$ гранями на поверхности (рис. 4, *a*). A^3B^5 нанощнуры имеют структуру цинковой обманки. Предложено и проведенными расчетами обосновано [25] ее изменение, предполагающее образование небольших по размеру реконструированных $\{112\}$ граней между соседними $\{011\}$ гранями (рис. 4, *б*), определяющими поверхность этих наноструктур. Установлено, что предложенная морфология является более стабильной по полной энергии.

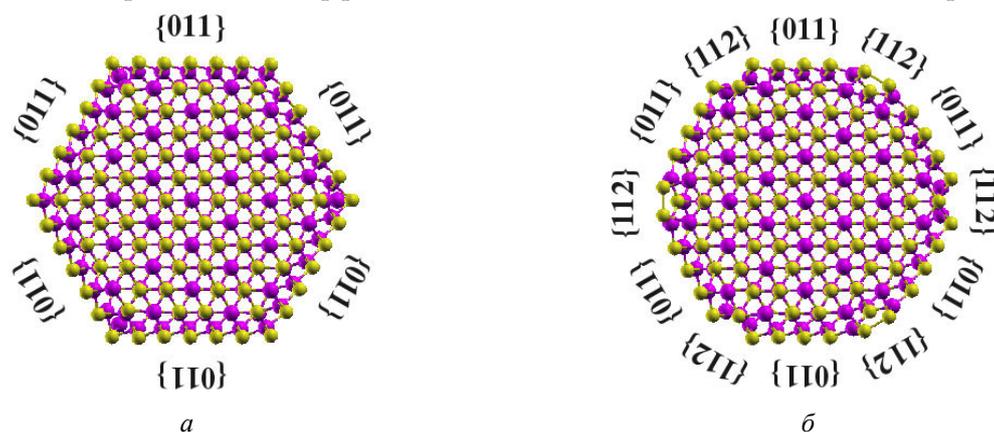


Рис. 4. Сечения A^3B^5 нанощнуров с диаметром около 2,6 нм с $\{011\}$ гранями (*a*) и с $\{011\}$ и $\{112\}$ гранями (*б*). Атомы третьей группы – темные, а атомы пятой группы – светлые [25]

Для A^3B^5 нанощнуров без $\{112\}$ граней на поверхности соответствующие зонные диаграммы имеют энергетическую щель (рис. 5 – верхняя панель), в которой находятся полузаполненные локализованные состояния в районе уровня Ферми. Эти состояния обусловлены p -электронами атомов, находящимися на краях между соседними $\{011\}$ гранями и обладающими двумя или тремя оборванными связями. Появление небольших $\{112\}$ граней на поверхности, выступающих в роли кромок, приводит к исчезновению локализованных состояний (уровень Ферми находится в запрещенной зоне и не пересекает энергетические зоны), как видно на рис. 5 – нижняя панель.

Установлено [25], что для GaP и GaAs нанощнуров характерно наличие двух сравнимых по энергии минимумов зоны проводимости в Γ и Z точках, в то время как максимум валентной зоны находится в Γ точке, что позволяет утверждать о квазипрямозонном характере запрещенной зоны. GaSb нанощнуры являются непрямозонными полупроводниками, так как минимум зоны проводимости находится в точке Z , а максимум валентной зоны в Γ точке. При увеличении диаметра этих нанощнуров происходит уменьшение ширины запрещенной зоны и появление прямозонного характера запрещенной зоны. При диаметрах ~ 4 нм прямой переход наблюдается в точке Γ из-за смещения вверх по энергии минимума зоны проводимости в точке Z . InP, InAs и InSb нанощнуры являются прямозонными полупроводниками, если значения их диаметров находится в диапазоне 2–4 нм.

Аналогично изучено влияние морфологии нанощнуров Si и Ge на их стабильность и предсказаны особенности реконструкции граней и кромок между гранями, которые обладают поверхностными атомами только с одной оборванной связью [26]. В случае нанощнуров и нанотрубок TiO_2 установлено влияние морфологии на их стабильность и выявлена роль поверхностных состояний, которые определяют экстремумы электронных энергетических зон и нивелируют влияние квантово-размерных эффектов [27, 28]. В случае нанощнуров Ca_2Si показано, что появление определенных граней на поверхности может приводить к изменению полупроводниковых свойств на металлические [29].

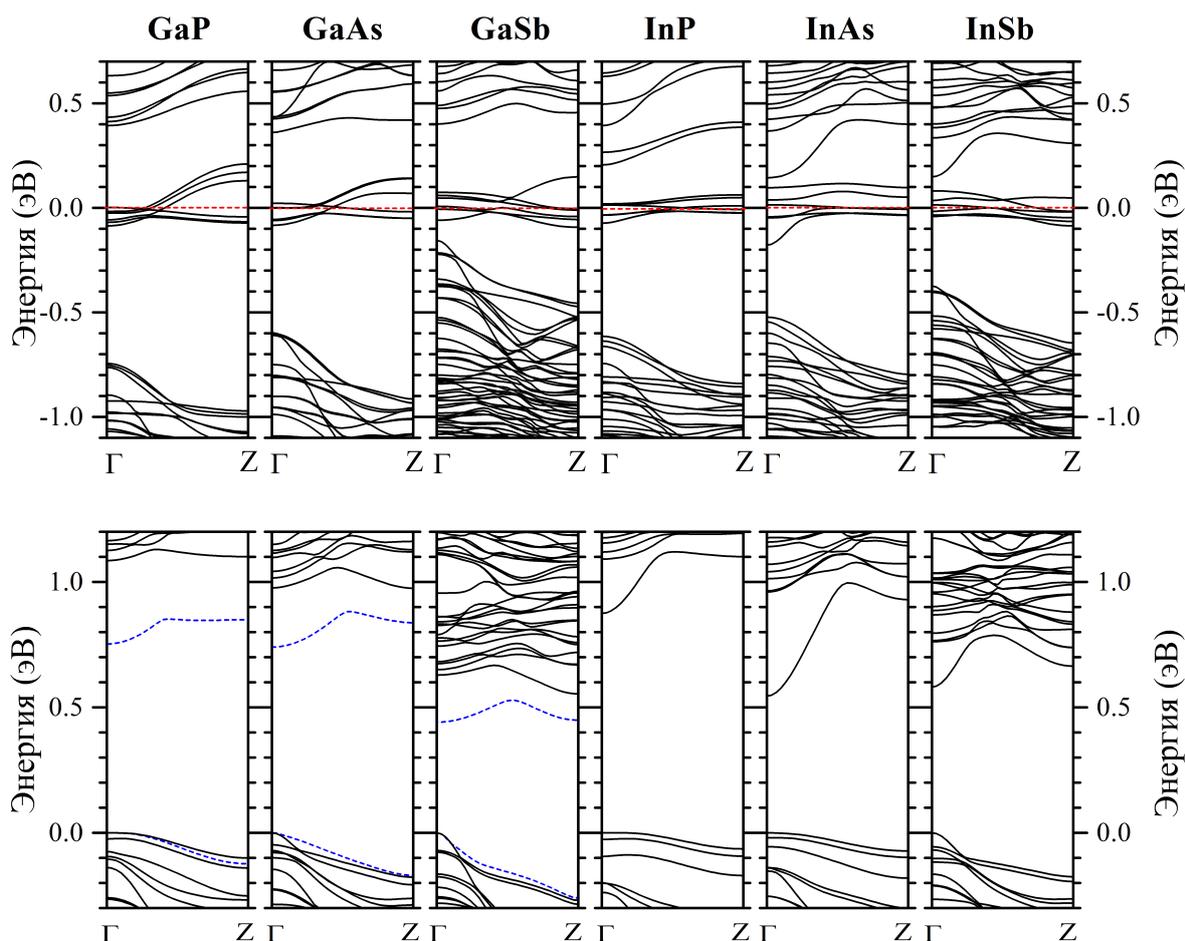


Рис. 5. Зонные структуры A^3B^5 нанопроволок с диаметрами $\sim 2,6$ нм без $\{112\}$ граней (верхняя панель) и с $\{112\}$ гранями (нижняя панель). Для GaP, GaAs и GaSb нанопроволок с $\{112\}$ гранями и диаметром ~ 4 нм верхняя по энергии валентная зона и нижняя по энергии зона проводимости представлены пунктирными линиями [25]

Нульмерные структуры – наноалмазы

Из всего многообразия нульмерных структур для теоретического анализа авторами были выбраны наноалмазы с точечными дефектами в кристаллической решетке. Это перспективные твердотельные структуры для квантовой обработки информации. С этой точки зрения наиболее привлекательным является дефектный центр «азот-вакансия» (NV-центр), который состоит из замещающего атома азота (N) и вакансии (V) в соседних узлах кубической решетки алмаза.

Для практической реализации разрабатываемых квантовых технологий используются системы с изотопом углерода ^{13}C , обозначаемые $^{13}\text{C}[\text{NV}]^-$. Для таких структур авторами рассчитаны важные для практического использования элементы матриц сверхтонкого взаимодействия (СТВ) с учетом ядерных спинов, экспериментальное определение которых затруднено.

Проведенный анализ характеристик СТВ в нанокластере алмаза $\text{C}_{291}\text{H}_{172}[\text{NV}]^-$, содержащем NV-центр [30, 31], показал, что он содержит «семейства» атомов ^{13}C с эквивалентными положениями, ядерный спин ^{13}C в которых не испытывает стохастических переворотов, индуцируемых его СТВ с электронным спином NV-центра. Это позволило количественно описать имеющиеся экспериментальные данные.

Аналогичным образом расчеты для нанокластера большего размера – $\text{C}_{510}\text{H}_{252}[\text{NV}]^-$, NV-центр в котором находился в различных позициях [32–41], позволили впервые получить характеристики СТВ для восьми спиновых систем NV-«осевой ^{13}C », где ядерный спин располагался на гораздо большем расстоянии от NV-центра как до вакансии, так и до атома азота. Полученные характеристики стабильности систем $^{13}\text{C}[\text{NV}]^-$ показали хорошее

количественное соответствие с экспериментальными данными, что дает возможность применять используемые методы компьютерного моделирования для прогнозирования новых экспериментов на системах типа $^{13}\text{C}[\text{NV}]^-$ [32–41].

В дополнение к ожидаемым положениям атома $^{13}\text{C}^-$ на оси NV-центра для кластера $\text{C}_{510}\text{H}_{252}[\text{NV}]$ предсказано существование нового класса таких стационарных систем $\text{NV}-^{13}\text{C}$, в которых ядерный спин ^{13}C расположен в плоскости, перпендикулярной оси NV-центра. На основе рассчитанных спиновых параметров и построенного спин-гамильтониана были рассчитаны времена жизни для всех возможных положений ядерного спина ^{13}C в кластере.

Сделанные предсказания экспериментально подтверждены специально поставленным экспериментом, выполненным специалистами Института квантовой оптики университета г. Ульм, Германия. Результаты совместно опубликованы в работе [32] и вошли в Топ-10 результатов деятельности ученых Академии наук за 2018 год в области фундаментальных и прикладных исследований.

Развитие работ по NV-центрам в наноалмазах получило продолжение в недавних исследованиях для таких центров, как «кремний-вакансия» (SiV), «германий-вакансия» (GeV) и «олово-вакансия» (SnV) [42]. Эти центры также рассматриваются в качестве перспективных, но пока недостаточно исследованных носителей квантовой информации. Авторами оптимизирована атомарная структура нанокластеров $\text{C}_{128}\text{H}_{98}[\text{SiV}]$, $\text{C}_{128}\text{H}_{98}[\text{GeV}]$ и $\text{C}_{128}\text{H}_{98}[\text{SnV}]$, в которых дефектные центры расположены в центральной части кластера, рассчитана структура электронных энергетических зон и распределение спиновой плотности по кластеру.

Заключение

Выполненный поиск и теоретическое обоснование устойчивых атомарных конфигураций, а также предсказанные электронные, оптические и магнитные свойства двумерных кристаллов из дихалькогенидов тугоплавких металлов, двумерных слоев из полупроводниковых силицидов, квантовых шнуров из полупроводниковых соединений A^3B^5 , кремния, германия, диоксида титана, силицида кальция и дефектных центров в наноалмазах показали их перспективность для нано- и оптоэлектроники, спинтроники, солнечной и термоэлектрической энергетики, квантовой обработки информации. Продвижение этих результатов к практической реализации ведется в кооперации с отечественными и зарубежными учеными-экспериментаторами и разработчиками элементной базы информационных систем нового поколения.

Список литературы

1. Нанoeлектроника: Теория и практика / В.Е. Борисенко [и др.]. М.: Бином, 2013. 366 с.
2. Борисенко В.Е., Данилюк А.Л., Мигас Д.Б. Спинтроника. М.: Лаборатория знаний, 2017. 229 с.
3. Borisenko V.E., Ossicini S. What is What in the Nanoworld. Third, Revised and Enlarged Edition. Weinheim: Wiley-VCH, 2012. 601 p.
4. Кривошеева А.В., Шапошников В.Л., Борисенко В.Е. Методика моделирования электронных свойств объемных полупроводниковых соединений // Докл. БГУИР. 2017. № 4 (106). С. 70–76.
5. Electronic and optical properties of two-dimensional MoS_2 , WS_2 , and $\text{Mo}_{0.5}\text{W}_{0.5}\text{S}_2$ from first-principles. In: Physics, Chemistry and Application of Nanostructures / A.V. Krivosheeva [et al.]. Singapore: World Scientific, 2013. P. 32–35.
6. Electronic and dynamical properties of bulk and layered MoS_2 / A.V. Krivosheeva [et al.] // Докл. БГУИР. 2014. № 5 (83). С.34–37.
7. Band gap modifications of two-dimensional defected MoS_2 / A.V. Krivosheeva [et al.] // Int. J. Nanotechnol. 2015. Vol. 12(8/9). P. 654–662.
8. Theoretical study of defect impact on two-dimensional MoS_2 / A.V. Krivosheeva [et al.] // J. of Semiconductors. 2015. Vol. 36 (12). P. 122002.
9. Кривошеева А.В., Шапошников В.Л., Борисенко В.Е. Модификация ширины запрещенной зоны MoS_2 при замещении атомов серы атомами теллура // Докл. БГУИР. 2016. № 4 (98). С. 98–101.
10. Кривошеева А.В., Шапошников В.Л., Борисенко В.Е. Зонная структура и оптические свойства дихалькогенидов молибдена и вольфрама // Вестн. Фонда фундаментальных исследований. 2016. Т. 3. С. 41–48.

11. Расчет фононных спектров двумерных кристаллов дисульфида и дителлурида молибдена / А.Ю. Алексеев [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. 2016. Т. 83 (6). С. 989–992.
12. Моделирование спектра фононов в трехкомпонентных двумерных кристаллах дихалькогенидов тугоплавких металлов / А.Ю. Алексеев [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. 2017. Т. 84 (4). С. 554–560.
13. Electronic properties of bulk and monolayer TMDs: theoretical study within DFT framework GJVJ-2e method / J. Gusakova [et al.] // Phys. Status Solidi A. 2017. Vol. 214 (12). P. 1700218 (1–7).
14. Lattice thermal conductivity of transition metal dichalcogenides / A. Alexeev [et al.] // Materials Physics and Mechanics. 2018. Vol. 39 (1). P. 1–7.
15. Shaposhnikov V.L., Krivosheeva A.V., Borisenko V.E. Impact of Defects on Electronic Properties of Heterostructures Constructed From Monolayers of Transition Metal Dichalcogenides // Phys. Stat. Sol. B. 2019. DOI: 10.1002/pssb.201800355.
16. Кривошеева А.В., Шапошников В.Л., Борисенко В.Е. Влияние вакансионных дефектов и примесей на электронную структуру двумерных кристаллов MoS_2 , MoSe_2 , WS_2 и WSe_2 // Докл. НАН Беларуси. 2016. Т. 60, № 6. С. 48–53.
17. Кривошеева А.В., Шапошников В.Л. Магнитное упорядочение в гетероструктурах на основе двумерных кристаллов дихалькогенидов тугоплавких металлов, легированных марганцем // Вестн. фонда фундаментальных исследований. 2017. Т. 80, № 2 (17). С. 106–112.
18. Кривошеева А.В., Шапошников В.Л., Алексеев А.Ю. Влияние дефектов на электронные свойства структур из слоистых дихалькогенидов тугоплавких металлов // Докл. БГУИР. 2016. № 8 (102). С. 76–81.
19. Кривошеева А.В. Перспективные полупроводниковые соединения и наноструктуры для оптоэлектроники, фотовольтаики и спинтроники // Докл. БГУИР. 2016. № 3 (97). С. 12–17.
20. Semiconducting Silicides / Ed. by V.E. Borisenko. Berlin: Springer, 2000. 348 p.
21. Quasi-2D silicon structures based on ultrathin Me_2Si ($\text{Me} = \text{Mg}, \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}$) films / D.B. Migas [et al.] // Surface Science. 2018. Vol. 670, № 1. P. 51–57.
22. Electronic properties of thin BaSi_2 films with different orientations / D.B. Migas [et al.] // Jpn. J. Appl. Phys. 2017. Vol. 56, № 3. P. 05DA03.
23. Transport properties of n- and p-type polycrystalline BaSi_2 / V.E. Borisenko [et al.] // Thin Solid Films. 2018. Vol. 661, № 4. P. 7–15.
24. Conductive CaSi_2 transparent in the near infra-red range / V.E. Borisenko [et al.] // J. of Alloys and Compounds. 2019. Vol. 770, № 2. P. 710–720.
25. Role of edge facets on stability and electronic properties of III–V nanowires // D.B. Migas [et al.] // Nano Convergence. 2015. Vol. 2. P. 14.
26. Revising morphology of $\langle 111 \rangle$ -oriented silicon and germanium nanowires / D.B. Migas [et al.] // Nano Convergence. 2015. Vol. 2. P. 16.
27. Orientation effects in morphology and electronic properties of anatase TiO_2 one-dimensional nanostructures. I. Nanowires / D.B. Migas [et al.] // Phys. Chem. Chem. Phys. 2014. Vol. 16, № 3. P. 9479–9489.
28. Orientation effects in morphology and electronic properties of anatase TiO_2 one-dimensional nanostructures. II. Nanotubes / D.B. Migas [et al.] // Phys. Chem. Chem. Phys. 2014. Vol. 16, № 3. P. 9490–9498.
29. Electronic properties of semiconducting Ca_2Si silicide: From bulk to nanostructures by means of first principles calculations / D.B. Migas [et al.] // Jpn. J. Appl. Phys. 2015. Vol. 54, № 2. P. 07JA03.
30. Theoretical study of hyperfine interactions and optically detected magnetic resonance spectra by simulation of the $\text{C}_{291}[\text{NV}]\text{H}_{172}$ diamond cluster hosting nitrogen-vacancy center / A.P. Nizovtsev [et al.] // New Journal of Physics. 2014. Vol. 16. P. 083014(1–21).
31. Сверхтонкое взаимодействие NV центра в алмазе с атомом ^{13}C , расположенным на оси центра: моделирование методом DFT / А.Л. Пушкарчук [и др.] // Сб. науч. ст. VIII Междунар. конф. «Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах». Минск, 2014. С. 164–169.
32. Non-flipping ^{13}C spins near an NV center in diamond: Hyperfine and Spatial Characteristics by DFT Simulation of the $\text{C}_{510}[\text{NV}]\text{H}_{252}$ Cluster / A.P. Nizovtsev [et al.] // New Journal of Physics. 2018. Vol. 20. P. 023022 (1–15).
33. DFT simulation of hyperfine interactions in the NV hosting carbon cluster $\text{C}_{510}[\text{NV}]\text{H}_{252}$: predictions for the «on-NV-axis» ^{13}C sites / A.P. Nizovtsev [et al.] // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures. Singapore: World Scientific, 2015. P. 24–27.
34. Non-flipping ^{13}C nuclear spins in NV diamond: Hyperfine and spatial characteristics from DFT simulation of the NV hosting H-terminated cluster $\text{C}_{510}[\text{NV}]\text{H}_{252}$ / A.P. Nizovtsev [et al.] // Book of Abstracts of XIV International Conference on Quantum Optics and Quantum Information, Minsk, Belarus. 2015. P. 47.
35. A semiempirical description of functionalized nanodiamonds with NV color centers / A.V. Luzanov [et al.] // Funct. Mater. 2016. Vol. 23 (2). P. 268–273.

36. Стабильные ядерные спины ^{13}C в комплексах «NV-аксиальный ^{13}C » в алмазе: Предсказание характеристик сверхтонкого взаимодействия моделированием кластера $\text{C}_{510}[\text{NV}]\text{H}_{252}$. / А.П. Низовцев [и др.] // Материалы V Междунар. конф. «Наноструктурные материалы-2016: Беларусь-Россия-Украина». Минск, 2016. С. 175–178.
37. Квантово-химическое моделирование электронных свойств функционализированных наноалмазов с центром окраски типа NV- / А.В. Лузанов [и др.] // Материалы V Междунар. конф. «Наноструктурные материалы-2016: Беларусь-Россия-Украина». Минск, 2016. С. 517–520.
38. Стабильные электронно-ядерные спиновые системы NV- ^{13}C в алмазе для квантовых технологий / А.П. Низовцев [и др.] // Изв. НАН Беларуси. 2017. № 1. С. 98–110.
39. Stable Electron-Nuclear Spin Systems NV- ^{13}C in Diamond for Quantum Technologies / A.L. Pushkarchuk [et al.] // Nonlinear Dynamics and Application: Proceeding of the 23 Annual Seminar NPC'S'2017. 2017. Vol. 23. P. 150–158.
40. Robust electron-nuclear spin systems NV- ^{13}C in diamond for quantum technologies / A.P. Nizovtsev [et al.] // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures. Singapore: World Scientific, 2017. P. 69–73.
41. Non-flipping ^{13}C spins in NV diamond: Hyperfine and Spatial Characteristics by DFT Simulation of the $\text{C}_{510}[\text{NV}]\text{H}_{252}$ Cluster A.P. Nizovtsev [et al.] // Book of Abstracts and Program of XV International Conference on Quantum Optics and Quantum Information, Minsk, Belarus. 2017. P. 43.
42. Новые парамагнитные центры окраски SiV, GeV и SnV в алмазе для квантовых технологий: характеристика методами квантовой химии / А.П. Низовцев [и др.] // Сб. науч. ст. X Междунар. конф. «Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах». Минск, 2018. С. 11–14.

References

1. Nanoelektronika: Teorija i praktika / V.E. Borisenko [i dr.]. M.: Binom, 2013. 366 s. (in Russ.)
2. Borisenko V.E., Daniljuk A.L., Migas D.B. Spintronika. M.: Laboratorija znanij, 2017. 229 s. (in Russ.)
3. Borisenko V.E., Ossicini S. What is What in the Nanoworld. Third, Revised and Enlarged Edition. Weinheim: Wiley-VCH, 2012. 601 p.
4. Krivosheeva A.V., Shaposhnikov V.L., Borisenko V.E. Metodika modelirovanija jelektronnyh svojstv ob'emnyh poluprovodnikovyh soedinenij // Dokl. BGUIR. 2017. № 4 (106). S. 70–76. (in Russ.)
5. Electronic and optical properties of two-dimensional MoS_2 , WS_2 , and $\text{Mo}_{0.5}\text{W}_{0.5}\text{S}_2$ from first-principles. In: Physics, Chemistry and Application of Nanostructures / A.V. Krivosheeva [et al.]. Singapore: World Scientific, 2013. P. 32–35.
6. Electronic and dynamical properties of bulk and layered MoS_2 / A.V. Krivosheeva [et al.] // Dokl. BGUIR. 2014. № 5 (83). S. 34–37. (in Russ.)
7. Band gap modifications of two-dimensional defected MoS_2 / A.V. Krivosheeva [et al.] // Int. J. Nanotechnol. 2015. Vol. 12 (8/9). P. 654–662.
8. Theoretical study of defect impact on two-dimensional MoS_2 / A.V. Krivosheeva [et al.] // J. of Semiconductors. 2015. Vol. 36 (12). P. 122002.
9. Krivosheeva A.V., Shaposhnikov V.L., Borisenko V.E. Modifikacija shiriny zapreshhennoj zony MoS_2 pri zameshhenii atomov sery atomami tellura // Dokl. BGUIR. 2016. № 4 (98). S. 98–101. (in Russ.)
10. Krivosheeva A.V., Shaposhnikov V.L., Borisenko V.E. Zonnaja struktura i opticheskie svojstva dihal'kogenidov molibdena i vol'frama // Vestnik Fonda fundamental'nyh issledovanij. 2016. T. 3. S. 41–48. (in Russ.)
11. Raschet fononnyh spektrov dvumernyh kristallov disulfida i ditellurida molibdena / A.Ju. Alekseev [i dr.] // Zhurnal prikladnoj spektroskopii. 2016. T. 83 (6). S. 989–992. (in Russ.)
12. Modelirovanie spektra fononov v trehkomponentnyh dvumernyh kristallah dihal'kogenidov tugoplavkih metallov / A.Ju. Alekseev [i dr.] // Zhurnal prikladnoj spektroskopii. 2017. T. 84 (4). S. 554–560. (in Russ.)
13. Electronic properties of bulk and monolayer TMDs: theoretical study within DFT framework GVVJ-2e method / J. Gusakova [et al.] // Phys. Status Solidi A. 2017. Vol. 214 (12). P. 1700218 (1–7).
14. Lattice thermal conductivity of transition metal dichalcogenides / A. Alexeev [et al.] // Materials Physics and Mechanics. 2018. Vol. 39 (1). P. 1–7.
15. Shaposhnikov V.L., Krivosheeva A.V., Borisenko V.E. Impact of Defects on Electronic Properties of Heterostructures Constructed From Monolayers of Transition Metal Dichalcogenides // Phys. Stat. Sol. B. 2019. DOI: 10.1002/pssb.201800355.
16. Krivosheeva A.V., Shaposhnikov V.L., Borisenko V.E. Vlijanie vakansionnyh defektov i primesej na jelektronnuju strukturu dvumernyh kristallov MoS_2 , MoSe_2 , WS_2 i WSe_2 // Dokl. NAN Belarusi. 2016. T. 60, № 6. S. 48–53. (in Russ.)
17. Krivosheeva A.V., Shaposhnikov V.L. Magnitnoe uporjadochenie v geterostrukturah na osnove dvumernyh kristallov dihal'kogenidov tugoplavkih metallov, legirovannyh margancem // Vestn. fonda fundamental'nyh issledovanij. 2017. T. 80, № 2 (17). S. 106–112. (in Russ.)

18. Krivosheeva A.V., Shaposhnikov V.L., Alekseev A.Ju. Vliyanie defektov na jelektronnye svoystva struktur iz sloistyh dihal'kogenidov tugoplavkikh metallov // Dokl. BGUIR. 2016. № 8 (102). S. 76–81. (in Russ.)
19. Krivosheeva A.V. Perspektivnye poluprovodnikovye soedineniya i nanostrukturny dlja optoelektroniki, fotovol'taiki i spintroniki // Dokl. BGUIR. 2016. № 3 (97). S. 12–17. (in Russ.)
20. *Semiconducting Silicides* / Ed. by V.E. Borisenko. Berlin: Springer, 2000. 348 p.
21. Quasi-2D silicon structures based on ultrathin Me₂Si (Me = Mg, Ca, Sr, Ba) films / D.B. Migas [et al.] // *Surface Science*. 2018. Vol. 670, № 1. P. 51–57.
22. Electronic properties of thin BaSi₂ films with different orientations / D.B. Migas [et al.] // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2017. Vol. 56, № 3. P. 05DA03.
23. Transport properties of n- and p-type polycrystalline BaSi₂ / V.E. Borisenko [et al.] // *Thin Solid Films*. 2018. Vol. 661, № 4. P. 7–15.
24. Conductive CaSi₂ transparent in the near infra-red range / V.E. Borisenko [et al.] // *J. of Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 770, № 2. P. 710–720.
25. Role of edge facets on stability and electronic properties of III–V nanowires // D.B. Migas [et al.] // *Nano Convergence*. 2015. Vol. 2. P. 14.
26. Revising morphology of <111>-oriented silicon and germanium nanowires / D.B. Migas [et al.] // *Nano Convergence*. 2015. Vol. 2. P. 16.
27. Orientation effects in morphology and electronic properties of anatase TiO₂ one-dimensional nanostructures. I. Nanowires / D.B. Migas [et al.] // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2014. Vol. 16, № 3. P. 9479–9489.
28. Orientation effects in morphology and electronic properties of anatase TiO₂ one-dimensional nanostructures. II. Nanotubes / D.B. Migas [et al.] // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2014. Vol. 16, № 3. P. 9490–9498.
29. Electronic properties of semiconducting Ca₂Si silicide: From bulk to nanostructures by means of first principles calculations / D.B. Migas [et al.] // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2015. Vol. 54, № 2. P. 07JA03.
30. Theoretical study of hyperfine interactions and optically detected magnetic resonance spectra by simulation of the C₂₉₁[NV]-H₁₇₂ diamond cluster hosting nitrogen-vacancy center / A.P. Nizovtsev [et al.] // *New Journal of Physics*. 2014. Vol. 16. P. 083014(1–21).
31. Sverhtonkoe vzaimodejstvie NV centra v almaze s atomom ¹³S, raspolozhennym na osi centra: modelirovanie metodom DFT / A.L. Pushkarchuk [i dr.] // *Sb. nauch. st. VIII Mezhdunar. konf. «Fullereny i nanostrukturny v kondensirovannyh sredah»*. Minsk, 2014. S. 164–169. (in Russ.)
32. Non-flipping ¹³C spins near an NV center in diamond: Hyperfine and Spatial Characteristics by DFT Simulation of the C₅₁₀[NV]H₂₅₂ Cluster / A.P. Nizovtsev [et al.] // *New Journal of Physics*. 2018. Vol. 20. P. 023022 (1–15).
33. DFT simulation of hyperfine interactions in the NV hosting carbon cluster C₅₁₀[NV] H₂₅₂: predictions for the «on-NV-axis» ¹³C sites / A.P. Nizovtsev [et al.] // *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures*. Singapore: World Scientific, 2015. P. 24–27.
34. Non-flipping ¹³C nuclear spins in NV diamond: Hyperfine and spatial characteristics from DFT simulation of the NV hosting H-terminated cluster C₅₁₀[NV]H₂₅₂ / A.P. Nizovtsev [et al.] // *Book of Abstracts of XIV International Conference on Quantum Optics and Quantum Information*, Minsk, Belarus. 2015. P. 47.
35. A semiempirical description of functionalized nanodiamonds with NV color centers / A.V. Luzanov [et al.] // *Funct. Mater.* 2016. Vol. 23 (2). P. 268–273.
36. Stabil'nye jadernye spiny ¹³C v kompleksah «NV-aksial'nyj ¹³C» v almaze: Predskazanie harakteristik sverhtonkogo vzaimodejstvija modelirovaniem klastera C₅₁₀[NV]H₂₅₂ / A.P. Nizovtsev [i dr.] // *Materialy V Mezhdunar. konf. «Nanostrukturnye materialy-2016: Belarus'-Rossija-Ukraina»*. Minsk, 2016. S. 175–178. (in Russ.)
37. Kvantovo-himicheskoe modelirovanie jelektronnyh svoystv funkcionalizirovannyh nanoalmazov s centrom okraski tipa NV- / A.V. Luzanov [i dr.] // *Materialy V Mezhdunar. konf. «Nanostrukturnye materialy-2016: Belarus'-Rossija-Ukraina»*. Minsk, 2016. S. 517–520. (in Russ.)
38. Stabil'nye jelektronno-jadernye spinovye sistemy NV-¹³C v almaze dlja kvantovyh tehnologij / A.P. Nizovtsev [i dr.] // *Izv. NAN Belarusi*. 2017. № 1. S. 98–110. (in Russ.)
39. Stable Electron-Nuclear Spin Systems NV-¹³C in Diamond for Quantum Technologies / A.L. Pushkarchuk [et al.] // *Nonlinear Dynamics and Application: Proceeding of the 23 Annual Seminar NPCS'2017*. 2017. Vol. 23. P. 150–158.
40. Robust electron-nuclear spin systems NV-¹³C in diamond for quantum technologies / A.P. Nizovtsev [et al.] // *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures*. Singapore: World Scientific, 2017. P. 69–73.
41. Non-flipping ¹³C spins in NV diamond: Hyperfine and Spatial Characteristics by DFT Simulation of the C₅₁₀[NV]H₂₅₂ Cluster A.P. Nizovtsev [et al.] // *Book of Abstracts and Program of XV International Conference on Quantum Optics and Quantum Information*, Minsk, Belarus. 2017. P. 43.
42. Novye paramagnitnye centry okraski SiV, GeV i SnV v almaze dlja kvantovyh tehnologij: harakterizacija metodami kvantovoj himii / A.P. Nizovtsev [i dr.] // *Sb. nauch. st. X Mezhdunar. konf. «Fullereny i nanostrukturny v kondensirovannyh sredah»*. Minsk, 2018. S. 11–14.

Сведения об авторах

Борисенко В.Е., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Кривошеева А.В., д.ф.-м.н., с.н.с. Центра 4.11 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Мигас Д. Б., д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Пушкарчук В.А., к.ф.-м.н., с.н.с. Центра 4.11 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Филонов А.Б., к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник Центра 4.11 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Шапошников В.Л., к.ф.-м.н., с.н.с. Центра 4.11 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел. +375-17-293-88-69; +375-29-778-59-64
e-mail: krivosheeva@bsuir.by
Кривошеева Анна Владимировна

Information about the authors

Borisenko V.E., D.Sci, professor, head of the department of micro- and nanoelectronics of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Krivosheeva A.V., D.Sci, senior researcher of Center 4.11 of R&D department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Migas D.B., D.Sci, associate professor, professor of the department of micro- and nanoelectronics of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Pushkarchuk V.A., PhD, senior researcher of Center 4.11 of R&D department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Filonov A.B., PhD, leading researcher of Center 4.11 of R&D department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Shaposhnikov V.L., PhD, senior researcher of Center 4.11 of R&D department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Address for correspondence

220013 Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6
Belarusian state university
of informatics and radioelectronics
тел. +375-17-293-88-69;
e-mail: krivosheeva@bsuir.by
Krivosheeva Anna Vladimirovna

УДК 537.531:621.039.537

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ЭКРАНОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ, НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ И ПЛЕНОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Л.М. ЛЫНЬКОВ, В.А. БОГУШ, Т.В. БОРБОТЬКО,
Н.В. НАСОНОВА, Е.С. БЕЛОУСОВА, О.В. БОЙПРАВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 15 февраля 2019

Аннотация. Представлены основные результаты исследований, полученные в 2014–2018 гг. в ходе выполнения научно-исследовательских работ по направлению «Материалы, элементы и устройства электронной техники».

Ключевые слова: алюминий, влагосодержащий материал, диоксид титана, керамзит, перлит, экран электромагнитного излучения, углерод.

Abstract. The main research results obtained in 2014–2018 in the direction «Materials, elements and devices of electronic equipment» are presented.

Keywords: aluminum, watercontaining material, titanium dioxide, expanded clay, perlite, electromagnetic radiation shield, carbon.

Doklady BGUIR. 2019, Vol. 120, No. 2, pp. 85-99

New technologies for creation of electromagnetic radiation shields based on modified powder, nanostructured and film materials

**L.M. Lynkou, V.A. Bogush, T.V. Borbot'ko,
N.V. Nasonova, E.S. Belousova, O.V. Boiprav**

Введение

В 2014–2018 гг. в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники проводились работы по совершенствованию и развитию исследований по созданию экранов электромагнитного излучения (ЭМИ) для различных сфер применения (радиоэкология, технические средства защиты информации, скрытие радиоэлектронных средств от обнаружения в микроволновом диапазоне и т. п.). В результате Н. В. Насоновой защищена докторская диссертация (2018 г.). Работы выполнялись в рамках программ Союзного государства, Фонда фундаментальных исследований, государственных программ Республики Беларусь, хозяйственных договоров, а также на инициативных началах. Кандидатские диссертации по данной тематике защищены О. В. Бойправ (2017 г.), Е. С. Белоусовой (2015 г.), А. А. Ахмедом (2015 г.), Я. Т. А. Аль-Адеми (2015 г.), М. Р. Неамахом (2014 г.).

Экраны ЭМИ на основе влагосодержащих материалов

Применение воды в качестве материала с высокими значениями диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь создает перспективу создания новых электромагнитных экранов и радиопоглотителей и повышения эффективности существующих, рабочая область частот которых занимает широкий диапазон – от 1 до 140 ГГц [1].

Для расширения возможностей применения воды она вводится в состав композиционных материалов путем пропитки диэлектрических пористых матриц, в качестве которых используются машинно-вязаное и нетканое полотна из синтетических (полиакрилонитрил) и натуральных (целлюлоза) волокон, порошковые сорбенты (цеолиты, силикагель и бентонит) и гигроскопичный органический полимер (на основе полиакриламида). Механические свойства композиционного материала в основном задаются видом и параметрами матрицы. Электромагнитные характеристики таких материалов определяются содержанием воды или водного раствора в матрице, использованием в составе водного раствора органических компонентов и солей металлов, а также структурными параметрами пористой матрицы. Эксплуатационные характеристики, включающие стабильность радиопоглощающих свойств при воздействии температур в диапазоне $-15...+110$ °С, регулируются за счет синтеза водных растворов с гигроскопичными компонентами. Введение в состав раствора органических компонентов и солей металлов предоставляет дополнительные возможности изменения электрических свойств влагосодержащих материалов путем введения дополнительных ионов, а также повышения эффективности процесса заполнения пористой матрицы за счет изменения смачиваемости материала [1, 2].

Электродинамическое моделирование характеристик распространения электромагнитных волн через диэлектрик с потерями (CST MICROWAVE STUDIO) показало, что экранирующие материалы на основе воды и водных растворов могут обеспечить ослабление ЭМИ до 7,4 дБ в диапазоне частот 1...12 ГГц и не менее 25,5 дБ в диапазоне частот 90...140 ГГц при толщине материала 1 мм [1]. Различные принципы конструирования радиопоглотителей позволяют получать на основе влагосодержащих композиционных материалов требуемые частотные зависимости ослабления и коэффициента отражения ЭМИ в соответствии с техническими требованиями. Введение в состав композиционного материала компонентов с магнитными свойствами позволяет дополнительно повысить эффективность радиопоглощения [3]. Величина ослабления линейно зависит от толщины влагосодержащего материала. На основе влагосодержащих композиционных материалов разработаны электромагнитные экраны и радиопоглотители толщиной от 1,5 до 10 мм, обеспечивающие ослабление ЭМИ $(10...35) \pm 2$ дБ, коэффициент отражения $(-14,0...-5,0) \pm 1,2$ дБ, рабочий диапазон частот которых составляет 0,7...140 ГГц, эффективно поглощающие как непрерывное ЭМИ мощностью от 1 мВт, так и ЭМИ с импульсной мощностью 20 кВт [1].

Высокая удельная поверхность применяемых пористых матриц ($300-540$ 000 м²/кг) обуславливает необходимость учета вклада связанной воды в модели общей диэлектрической проницаемости влагосодержащих композиционных материалов. Экспериментально установлено, что доля связанной воды в пористых матрицах может достигать до 40 масс.%(для цеолита NaX) и определяет характер зависимости диэлектрической проницаемости и удельного электрического сопротивления влагосодержащего материала от влагосодержания (рис. 1) [1].

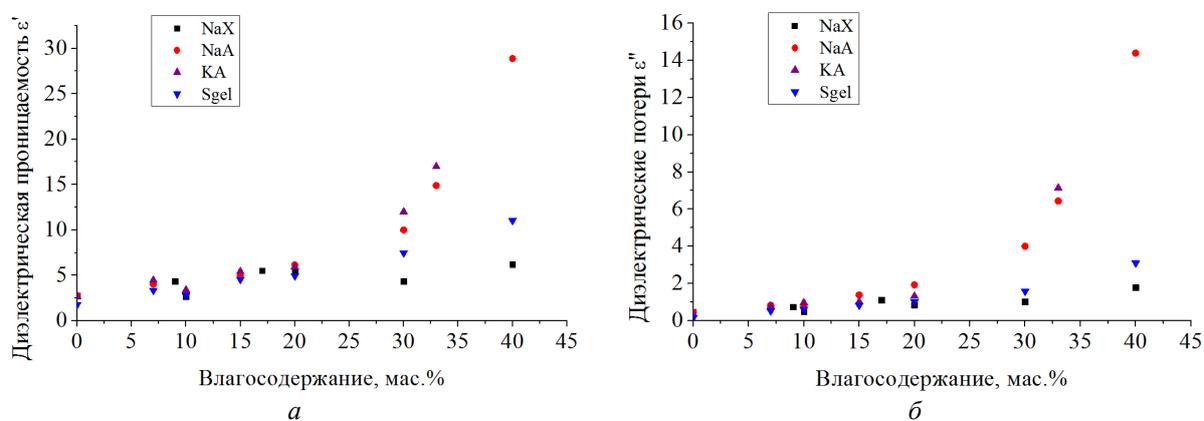


Рис. 1. Зависимость диэлектрических характеристик образцов влагосодержащего порошкового цеолита и силикагеля от влагосодержания на частоте 10 ГГц: а – диэлектрическая проницаемость; б – диэлектрические потери

В зависимости от вида и структуры матрицы и величины ее влагосодержания (5...70 масс.%), вида и концентрации раствора (0,1...1 М) можно получить величину диэлектрической проницаемости влагосодержащего композиционного материала от 2,5 до 58 в диапазоне частот 8...12 ГГц [4].

Величина поглощения ЭМИ диапазона 8...12 ГГц композиционными влагосодержащими материалами с влагосодержанием до 70 масс.% составляет до 28,32 дБ/см и определяется частотной дисперсией воды. В стабилизации величины поглощения ЭМИ в пределах $\pm 15\%$ при изменении температуры от -15 до 110 °С важную роль играет комбинированный механизм сорбции молекул воды на поверхности микропористых матриц и в водных растворах гигроскопичных веществ (CaCl_2 , MgCl_2 , ZnCl_2), что позволяет расширить диапазон применения электромагнитных экранов на основе таких материалов [1].

На основе разработанных влагосодержащих композиционных материалов предложены различные конструкции радиопоглотителей для применения в различных областях – уменьшения эффективной поверхности рассеяния наземных объектов на 4–20 дБ в диапазоне частот 9...11 ГГц и 17...19 ГГц, снижения уровня ЭМИ радиоэлектронных устройств на организм человека на 10...20 дБ в диапазоне частот 0,7...6,0 ГГц [5].

Исследования электрических свойств влагосодержащих композиционных материалов в диапазоне частот от 50 Гц до 1 МГц показали, что, регулируя технологические параметры таких материалов, можно получать удельное электрическое сопротивление от 0,004 кОм·м до 130 кОм·м (на частоте 1 кГц), что коррелирует с электрическими свойствами различных биологических тканей организма – мышц, кожи, мозга и др. [6]. Это позволило предложить их в качестве электрических эквивалентов биологических тканей человека для натурной оценки силы магнитных и электрических воздействий и создания фантомов организма человека [7].

Для формирования влагосодержащих конструкций экранов ЭМИ предложено использовать керамзит, характеризующийся размером фракций 1...2 мм (размер пор 0,02...0,04 мм) и 2...4 мм (размер пор 0,01...0,02 мм) (рис. 2), пропитываемый водным раствором хлорида натрия с концентрацией растворенного вещества 20 %. Установлено, что влагосодержание такого материала зависит от размера пор, а также от методов его пропитки. Предложено пропитку такого материала выполнять методами иммерсионного смачивания и под вакуумом, что позволяет получать материал с влагосодержанием, варьируемым в пределах 27...42 %, за счет варьирования параметров технологических режимов, что оказывает существенное влияние на коэффициенты отражения и передачи конструкций экранов ЭМИ, изготавливаемых на его основе.

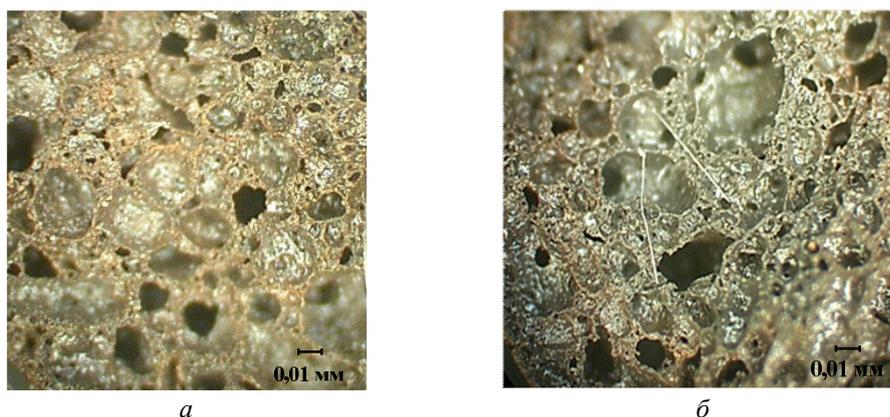


Рис. 2. Микрофотография поверхности керамзита:
а – размер фракций 1...2 мм; *б* – размер фракций 2...4 мм

Применение в качестве растворного наполнителя хлорида натрия позволяет синтезировать электролит с диэлектрической проницаемостью порядка 23, причем диэлектрические потери раствора имеют незначительную зависимость от температуры, что позволяет создавать конструкции экранов ЭМИ, характеризующиеся стабильностью своих характеристик в интервале температур -50 ... $+50$ °С. Увеличение концентрации ионов натрия и хлора в растворе приводит к увеличению его электропроводности, которая снижается

при уменьшении подвижности ионов раствора. Механизм ослабления ЭМИ обуславливается вращательным движением диполей воды, имеющих постоянный дипольный момент порядка $6,2 \cdot 10^{-30}$ Кл. Установлено, что на ослабление ЭМИ указанного электролита влияет его вязкость, определяющая подвижность ионов растворенного в нем хлорида натрия и диполей воды.

Показано, что увеличение вязкости электролита в интервале $1,6 \cdot 10^{-3} \dots 59,1 \cdot 10^{-3}$ Па·с, вводимого в поры керамзита, приводит к увеличению коэффициента отражения конструкции экрана ЭМИ с $-19,4$ до $-0,4$ дБ и снижению коэффициента передачи с -5 до $-28,6$ дБ в диапазоне частот $0,9 \dots 17$ ГГц. Установлено, что в диапазоне частот $0,9 \dots 3$ ГГц снижение значений коэффициента отражения обусловлено в большей степени влиянием ионной проводимости раствора хлорида натрия, а в диапазоне частот $3 \dots 17$ ГГц – дипольно-релаксационной поляризацией молекул воды в вязкой среде [8, 9].

Также обоснована перспективность использования сфанговых мхов и влагосодержащих иглопробивных полотен для получения эффективных экранов ЭМИ [10, 11]. Экраны на основе указанных материалов могут характеризоваться значениями коэффициентов отражения и передачи ЭМИ в диапазоне частот $0,7 \dots 17$ ГГц соответственно -10 и -18 дБ.

Разработанные конструкции экранов являются перспективными для их применения при решении задач радиолокационной заметности вооружения и военной техники за счет снижения дальности ее обнаружения, а также решения задач, связанных с защитой информации от утечки по электромагнитному каналу за счет ослабления побочного ЭМИ средств вычислительной техники

Экраны ЭМИ на основе оксидосодержащих порошкообразных материалов

Предложены многослойные экраны ЭМИ на основе порошкообразного диоксида титана. Поверхностный (согласующий) слой таких экранов изготовлен из целлюлозы и борной кислоты. Второй слой, который является поглощающим, представляет собой композиционный материал, полученный путем равномерного распределения диоксида титана в целлюлозном связующем. Третий слой, являющийся отражающим, также представляет собой композиционный материал с целлюлозным связующим и проводящим наполнителем в виде опилок железа и алюминия. Предложенные многослойные экраны характеризуются низкими значениями коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот $0,7 \dots 17$ ГГц, которые изменяются в пределах $-20 \dots -50$ дБ, что обусловлено наличием в составе этих экранов проводящих компонентов. Резонансное значение коэффициента отражения ЭМИ предложенных экранов составляет -20 дБ. Частота, соответствующая этому значению, зависит от толщины слоев многослойного экрана ЭМИ, а также от соотношения компонентов этих слоев [12].

Для изготовления недорогостоящих экранирующих ЭМИ строительных материалов предложено использовать порошкообразные отходы плавки чугуна, основным компонентом которых является оксид трехвалентного железа [13]. На основе этих отходов, портландцемента и керамзитового пористого гравия получены радиоэкранирующие строительные материалы в форме кирпичей, номинальные размеры которых составляют $250 \times 120 \times 65$ мм, а масса – $3,6$ кг (рис. 3).



Рис. 3. Внешний вид радиоэкранирующего строительного материала

Установлено, что у строительных конструкций, выполненных из разработанных радиоэкранирующих кирпичей, значения коэффициентов передачи ЭМИ в диапазоне частот $0,7 \dots 17$ ГГц ниже на $10 \dots 35$ дБ, чем у конструкций из силикатных кирпичей (рис. 4).

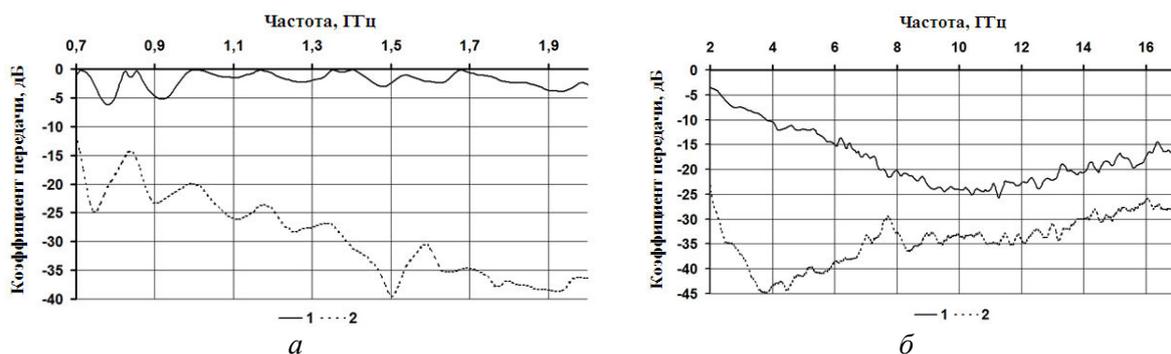


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 0,7...2 ГГц (а) и 2...17 ГГц (б) строительной конструкции из силикатных кирпичей (кривые 1) и из разработанных радиоэкранирующих кирпичей на основе порошкообразных отходов плавки чугуна (кривые 2)

Обоснована перспективность использования порошкообразного перлита для изготовления эффективных и технологичных экранов ЭМИ, характеризующихся невысокой массой [14, 15]. Получены композиты на основе порошкообразного перлита и строительных материалов (цемент, гипс). Такие композиты предназначены для изготовления отделочных модулей (рис. 5) для стен экранируемых помещений. Масса 1 м² этих модулей составляет 5 кг, величины их коэффициентов отражения и передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7...17 ГГц изменяются в пределах -5...-20 дБ (рис. 6) и -15...-25 дБ соответственно [16, 17].



Рис. 5. Внешний вид модуля на основе порошкообразного перлита для отделки стен экранируемых помещений

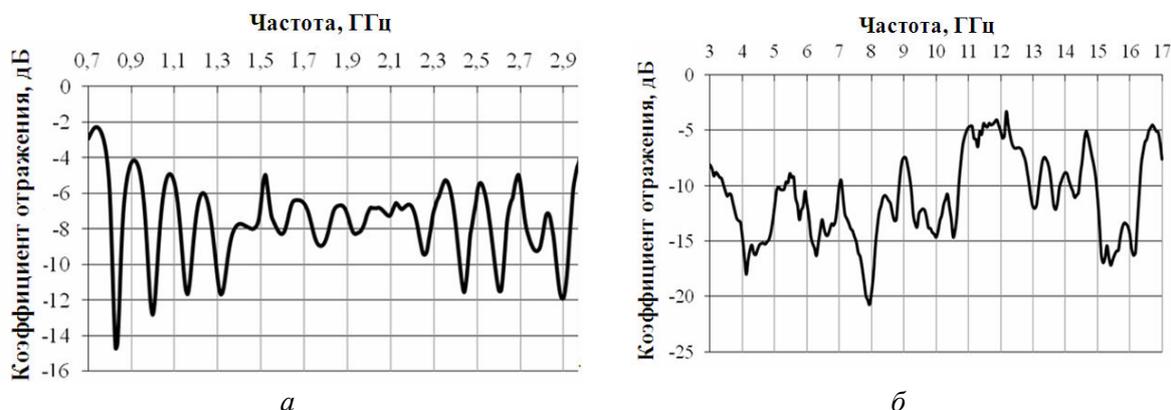


Рис. 6. Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7...3 ГГц (а) и 3...17 ГГц (б) модуля на основе порошкообразного перлита для отделки стен экранируемых помещений

Наноструктурированные углеродосодержащие экраны ЭМИ

Многие годы учеными велись исследования способов построения пассивных средств защиты информации. Было установлено, что для экранирования ЭМИ наиболее эффективными являются конструкции, основанные на композиционных материалах. Создание таких материалов осуществляется путем подбора концентрации порошкообразного наполнителя и связующего с учетом желаемых свойств и характеристик. Углеродосодержащие компоненты являются наиболее распространенным материалом для создания экранов электромагнитного излучения. В зависимости от вида углерода (технический углерод, уголь), отличающихся структурой и свойствами, возможно получение экранов ЭМИ, применяемых для разных частотных диапазонов [18–20].

Среди требований, которые предъявляются к экранам электромагнитного излучения, присутствуют не только значения коэффициентов отражения и передачи, но и свойства легкости, гибкости и прочности. Поэтому разработаны экраны электромагнитного излучения на основе водных растворов CaCl_2 или MgCl_2 [21], способных сохранять коллоидное состояние за счет присутствия и удержания в них связанной воды кристаллогидратами $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ и $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. На основе полученных растворов сформированы пластичные экраны с характеристикой ослабления ЭМИ при толщине экрана 3...4 мм более 35 дБ, коэффициент отражения изменяется в пределах $-5,3 \dots -5,9$ дБ в диапазоне частот 8...12 ГГц. Использование данного композиционного материала на поверхности объектов специального назначения позволяет скрыть их на фоне торфяных сфагновых или подзолистых почв.

Получены красочные покрытия для маскировки средств военной техники на основе композиционной шунгитосодержащей краски [22, 23] с добавлением порошков титаномагнетита и диоксида титана. Данные покрытия обладают свойством устойчивости к открытому пламени за счет их вспенивания, что объясняется образованием в составе покрытий ортоклаза (до 63 масс.%), кремния (до 4 масс.%) и сохранением рутила и оксида циркония, и характеризуются коэффициентом отражения электромагнитного излучения $-10 \dots -13,5$ дБ в диапазоне частот 8...12 ГГц.

Проведено экспериментальное обоснование физико-химических процессов, происходящих в структуре природного углеродосодержащего минерала, шунгита, при его термообработке в разных средах [19]. Доказано, что термообработка порошков шунгита в вакууме при температуре 900 °С приводит к образованию ортоклаза с содержанием до 13 %. При термообработке порошкообразного шунгита в атмосфере хлорида аммония содержание ортоклаза увеличивается до 21 %, при этом наибольшее значение содержания ортоклаза (68 %) получено при термообработке на воздухе (900 °С). В результате проведенных исследований замечено сохранение содержания наноразмерных многослойных фуллереноподобных глобул при термообработке в вакууме и снижение их содержания до нулевых значений при термообработке в среде хлорида аммония и на воздухе в сочетании с переходом диоксида кремния в ортоклаз.

Созданы конструкции отделочных панелей для электромагнитного экранирования СВЧ-источников и обеспечения экологической защиты обслуживающего персонала и пользователей персональных компьютеров на основе композиционного покрытия с добавлением порошкообразного древесного угля [20] с различными связующими компонентами. Нанесение разработанного композиционного покрытия на поверхность конструкции с неоднородностями приводит к уменьшению ЭМИ в среднем до -18 дБ в диапазоне частот 2...17 ГГц.

Разработана методика инкорпорирования частиц углерода в состав нетканых синтетических полотен методом пропитки [24]. Благодаря хаотичному расположению волокон синтетического полотна частицы углерода проникают вглубь материала за счет полного погружения полотна в водный углеродосодержащий раствор. Таким образом, возможно создавать волокнистые материалы, содержащие частицы углерода и характеризующиеся низким коэффициентом отражения и передачи при небольшой толщине, которые обладают гибкостью и прочностью. При этом порошок технического углерода не статичен в структуре волокнистого материала, что отражается на изменении экранирующих характеристик. Дальнейшие исследования были направлены на решение задачи закрепления порошка технического углерода в составе волокнистого материала.

Предложено использование углеродосодержащих клеевых составов для закрепления частиц углерода в составе волокнистых или вспененных материалов [24]. Данные материалы обладают низким коэффициентом отражения (порядка -14 дБ) и коэффициентом передачи (-10 дБ) в диапазоне частот $8-12$ ГГц, что объясняется глубоким прохождением частиц углерода в структуру материала, его закреплением на волокнах в виде агломератов и заполнением пустого пространства углеродосодержащим материалом (рис. 7).

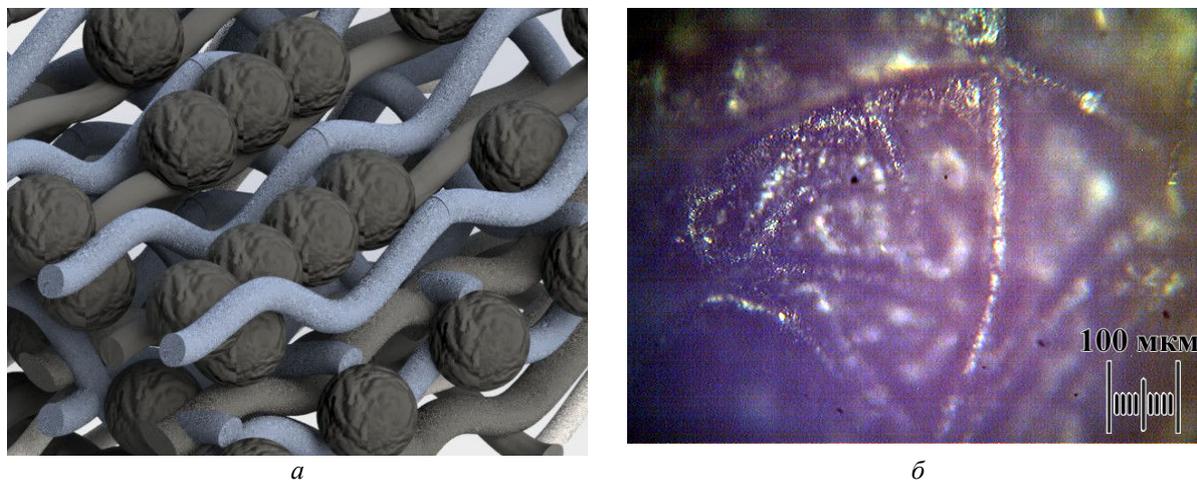


Рис. 7. Структура (а) и микрофотография (б) поверхности синтетического материала, пропитанного углеродосодержащим клеевым составом

Разработаны гибкие конструкции защитных экранов ЭМИ на основе углеродсодержащих порошковых наполнителей методом индивидуальной сборки с использованием клеевых основ (рис. 8). Данный экран представляет собой матрицу из полиэтиленовых ячеек, содержащих порошковый наполнитель. Ячейки размещались на поверхности двухслойного лавсан-полиэтиленового полотна.



Рис. 8. Вариант исполнения гибких конструкций защитных экранов ЭМИ на основе углеродсодержащих порошковых наполнителей:
а – схематическое изображение; б – внешний вид

Впервые предложено использование композитных материалов на основе порошков технического углерода для создания эластичных конструкций экранов ЭМИ, обладающих коэффициентом отражения порядка -15 дБ, коэффициентом передачи до -40 дБ в диапазоне частот $0,7... 17$ ГГц. Такие экраны характеризуются равномерной зависимостью коэффициента спектральной яркости ($0,027$ отн. ед.) в диапазоне длин волн $400...900$ нм, что коррелирует со значением коэффициентов для влажных почв серовато-бурого цвета. Это позволяет рекомендовать такие конструкции экранов ЭМИ для использования в целях создания имитаторов природных сред для скрытия от микроволновых и оптических средств обнаружения [25].

Предложены твердотельные конструкции экранов ЭМИ на основе композитов из технического углерода, измельченной древесины, порошков диоксида титана, перлита в разных соотношениях, образующих бетонные панели, характеризующиеся массой 1 кг/м^2 ,

коэффициентом отражения – 7...–10 дБ, коэффициентом передачи –17 дБ в диапазоне частот 0,7...17 ГГц [26].

Проведен комплекс исследований по изучению изменения свойств огнестойких красок при введении порошков технического углерода и диоксида титана. Установлено, что при воздействии открытого пламени на поверхности, покрытые данной краской, образуется кокс, содержащий рутил. При этом частотные характеристики коэффициентов отражения и передачи в диапазоне частот 0,7–17 ГГц изменяются на 10 %. Рекомендуется использование таких углеродосодержащих красок для нанесения на различные поверхности систем защиты от обнаружения средств технической разведки, эксплуатируемых в условиях открытого пламени.

Разработаны новые конструкции экранов ЭМИ с гибким основанием, на поверхности которых размещены объемные контейнеры, наполненные техническим углеродом с различными добавками. Масса модуля экрана размером 1 м² составляет 1,3 кг. Коэффициент отражения в диапазоне частот 0,7...17 ГГц отличается при расположении экранов относительно излучаемой антенны и составляет –5...–15 дБ при вертикальном размещении, –15...–35 дБ – при горизонтальном [27].

Конструкции экранов ЭМИ на основе алюминия и его оксидов

Разработана и апробирована методика получения эластичных экранов ЭМИ из фольги на основе алюминия и его оксидов. Эта методика включает в себя следующие этапы.

1. Формирование чехла, предназначенного для заполнения элементами из фольги, обеспечивающими ослабление энергии ЭМИ. Материал чехла – сетчатое полиэстеровое полотно с плотностью 50...70 г/м² и размером отверстий 2...3 мм.

2. Раскрой фольги на фрагменты. Габаритные размеры фрагментов должны быть сопоставимы с длиной электромагнитных волн в диапазоне частот, в котором изготавливаемый экран должен характеризоваться наибольшей эффективностью.

3. Равномерное распределение внутри чехла полученных элементов из фольги.

4. Разделение чехла, заполненного элементами из фольги, на ячейки путем ниточного соединения его передней и задней стенок вдоль направлений, условно образуемых параллельными линиями. Соединение должно быть реализовано таким образом, чтобы сечение ячеек в плоскости, параллельной поверхности экрана, характеризовалось квадратной формой. Длина, ширина и высота ячеек должны выбираться, исходя из критерия Рэлея.

Установлено, что масса 1 м² эластичных экранов ЭМИ, получаемых в соответствии с предложенной методикой, составляет не более 0,6 кг, высота ячеек – не более 10 мм.

На рис. 9 представлено фото образца экрана ЭМИ, полученного в соответствии с предложенной методикой.



Рис. 9. Фото образца эластичного экрана ЭМИ

На рис. 10, 11 представлены частотные зависимости коэффициентов отражения и передачи ЭМИ в диапазоне 2...17 ГГц эластичного экрана на основе алюминиевой фольги.

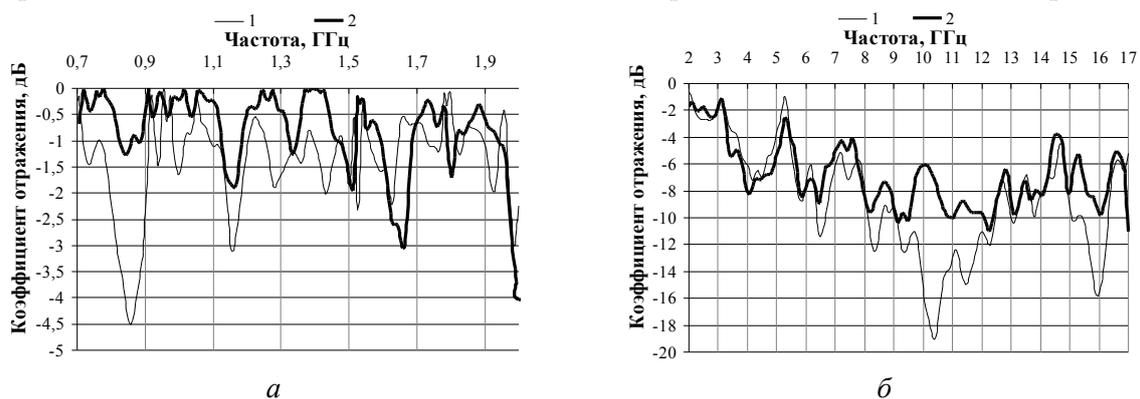


Рис. 10. Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7...2 ГГц (а) и 2...17 ГГц (б) эластичного экрана на основе алюминиевой фольги (1) и закрепленного на металлической пластине эластичного экрана на основе алюминиевой фольги (2)

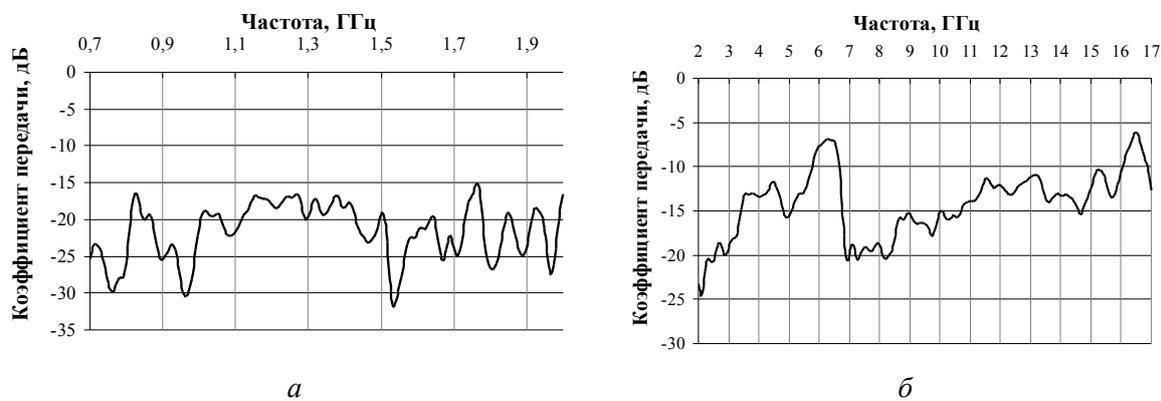


Рис. 11. Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 0,7...2 ГГц (а) и 2...17 ГГц (б) эластичного экрана на основе алюминиевой фольги

Из рис. 10 и 11 следует, что величины коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7...17 ГГц эластичного экрана на основе алюминиевой фольги изменяется в пределах от -2 до -19 дБ при величинах коэффициента передачи ЭМИ $-7...-30$ дБ. Минимальное значение коэффициента отражения ЭМИ такого экрана при высоте его ячейки 10 мм соответствует частоте 10,5 ГГц. Закрепление рассматриваемого экрана на металлической пластине приводит к снижению на 0,5...4 дБ значений ее коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7...2 ГГц и на 2...10 дБ в диапазоне частот 2...17 ГГц.

Разработана методика получения тонких эластичных экранов ЭМИ на основе алюминиевой фольги, характеризующихся гиротропными свойствами. Она включает в себя следующие этапы.

1. Формирование диэлектрической подложки из гибкого полимерного материала.

2. Нанесение на обе поверхности диэлектрической подложки полосковых киральных элементов, изготовленных из самоклеящейся фольги. Каждый из таких элементов должен представлять собой разомкнутый квадрат, одна из сторон которого имеет разрыв и пересекается под углом 90° в граничных точках этого разрыва с двумя параллельными линиями, длина которых в 2 раза меньше длины стороны квадрата. Полосковые киральные элементы, нанесенные на одну из поверхностей подложки, должны быть повернуты на 180° относительно элементов, нанесенных на другую поверхность.

На рис. 12 представлено фото фрагмента экрана ЭМИ с гиротропными свойствами, изготовленного в соответствии с разработанной методикой. Гиротропность свойств экрана, изготовленного в соответствии с предложенной методикой, обеспечивается в диапазоне частот 0,7...17 ГГц. Это обусловлено тем, что размеры частей полосковых киральных элементов такого экрана, а также расстояние между этими элементами и их частями сопоставимы с длиной электромагнитных волн в указанном диапазоне частот.

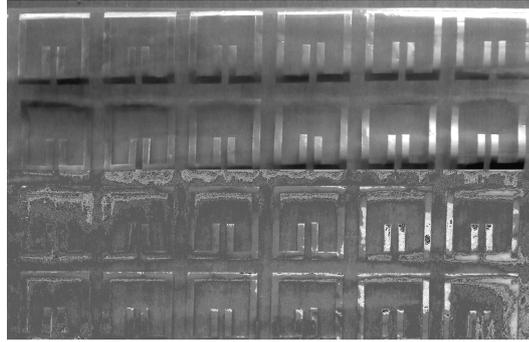


Рис. 12. Фото фрагмента экрана ЭМИ с гиротропными свойствами

На рис. 13, 14 представлены частотные зависимости коэффициентов отражения и передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7...17 ГГц экрана с гиротропными свойствами, изготовленного в соответствии с разработанной методикой.

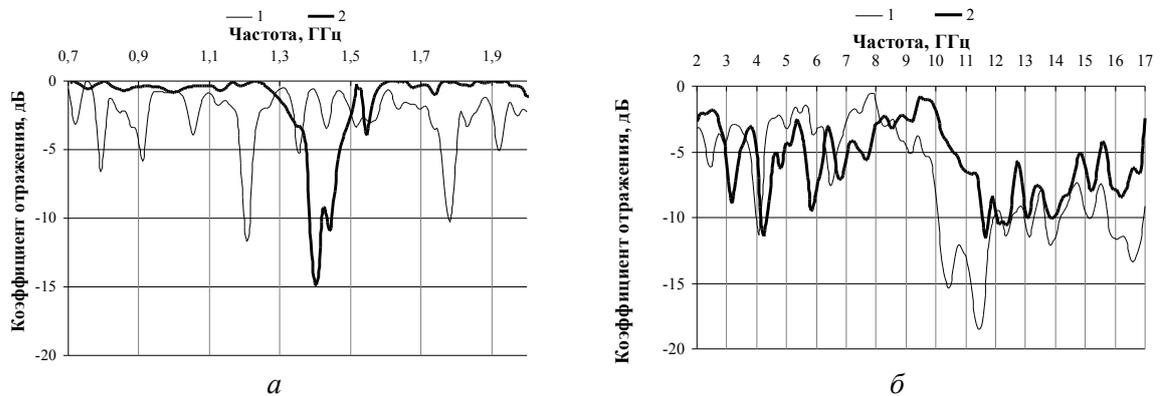


Рис. 13. Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7...2 ГГц (*а*) и 2...17 ГГц (*б*) тонкого эластичного экрана с гиротропными свойствами (1) и закрепленного на металлической пластине тонкого эластичного экрана с гиротропными свойствами (2)

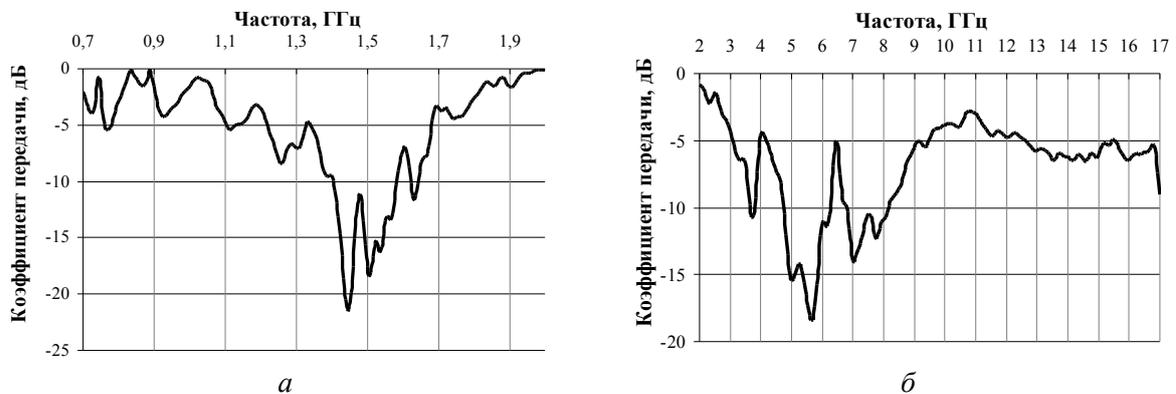


Рис. 14. Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 0,7...2 ГГц (*а*) и 2...17 ГГц (*б*) тонкого эластичного экрана с гиротропными свойствами

Из рис. 14 следует, что минимальное значение коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7...17 ГГц экрана с гиротропными свойствами составляет -15 дБ и соответствует частотам, длина электромагнитных волн на которых эквивалента геометрическим размерам частей полосковых киральных элементов либо расстоянию между этими элементами или их частями. Количество резонансных частот в диапазоне 0,7...17 ГГц (частот, на которых регистрируется минимальное значение коэффициента отражения ЭМИ) предлагаемого экрана с гиротропными свойствами – 20, что свидетельствует о его широкополосности по сравнению с аналогами. Это обусловлено тем, что его полосковые киральные элементы характеризуются другой конфигурацией и состоят из большего количества частей по сравнению с аналогами [28].

Экспериментально обосновано, что дополнительное снижение значений коэффициента отражения ЭМИ экранов на основе алюминиевых материалов возможно путем нанесения на поверхность последних слоя оксида алюминия методом пористого анодирования в гальваностатическом режиме с постоянной плотностью тока. Определено, что толщина слоя анодного оксида алюминия, который может быть сформирован на поверхности фольгированных материалов с применением указанного метода, составляет 10...25 мкм. На рис. 15 представлены микрофотографии поверхности и скола фольги, содержащей слой оксида алюминия.

а *б*

Рис. 15. Микрофотография поверхности (*а*) и скола (*б*) фольги, содержащей слой оксида алюминия

На рис. 16, 17 представлены частотные зависимости коэффициентов отражения и передачи фольги, содержащей слой анодного оксида алюминия, в зависимости от толщины последнего.

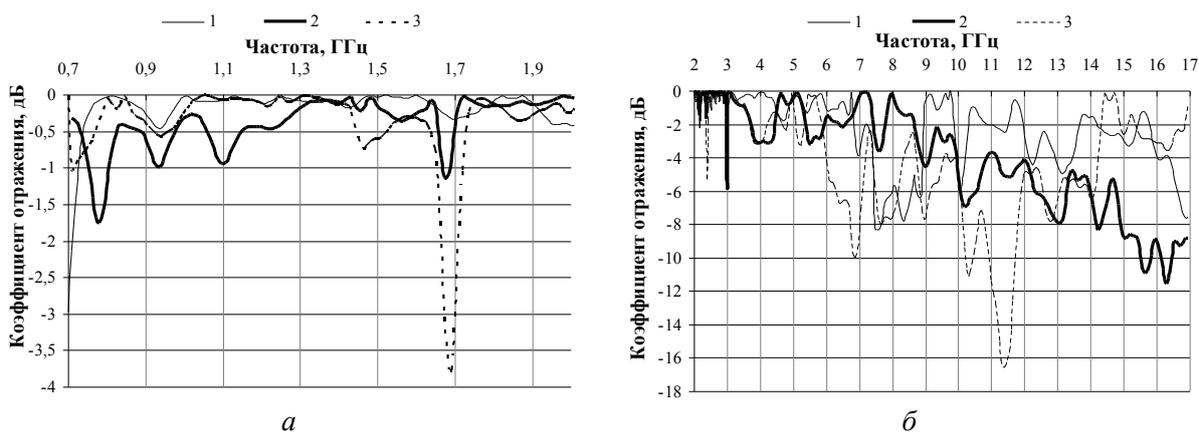


Рис. 16. Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7...2 ГГц (*а*) и 2...17 ГГц (*б*) фольги, содержащей слой оксида алюминия толщиной 10 мкм (кривая 1), 15 мкм (кривая 2) и 25 мкм (кривая 3)

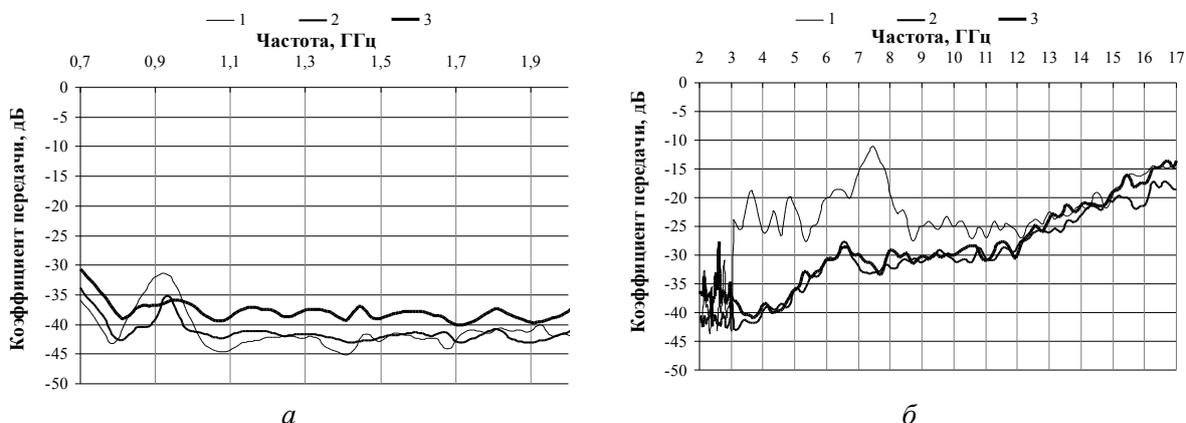


Рис. 17. Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7...2 ГГц (*а*) и 2...17 ГГц (*б*) фольги, содержащей слой оксида алюминия толщиной 10 мкм (кривая 1), 15 мкм (кривая 2) и 25 мкм (кривая 3)

Из рис. 16 и 17 следует, что величины коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7...17 ГГц фольги, содержащей слой оксида алюминия толщиной 10 мкм, 15 мкм и 25 мкм соответственно изменяются в пределах от $-0,1$ до -7 дБ, от $-0,1$ до -12 дБ и от $-0,1$ до -17 дБ. Значения коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7...3 ГГц такой фольги независимо от толщины последнего – от -30 до -45 дБ. В диапазоне частот 3...17 ГГц величина указанного параметра для образцов, на поверхность которых нанесен слой анодного оксида алюминия толщиной 15–25 мкм, изменяется в пределах от -15 до -40 дБ. Установлено, что уменьшение в 2 раза толщины слоя оксида алюминия на поверхности фольги приводит к увеличению на 5...20 дБ значения ее коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 2...11 ГГц [29, 30].

Модификация материалов для экранов ЭМИ с использованием метода химического осаждения металлов из водных растворов

Экспериментально обоснована возможность улучшения эффективности экранирования волокнистых и порошкообразных (силикагель, перлит, активированный уголь) материалов путем включения в их состав металлических частиц с использованием метода химического осаждения металлов (никеля или меди) из водных растворов [31]. Установлено снижение на 3...6 дБ значений коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 8...12 ГГц (при использовании металлического отражателя) ткани с наноструктурированным ферромагнитным микропроводом в результате химического осаждения из водных растворов частиц никеля и меди на поверхность ее волокон [32, 33].

Определено, что в результате модификации состава порошкообразного активированного угля путем химического осаждения в его поры никеля и меди обеспечивается снижение с -2 до $-10...-14$ дБ значений его коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 8...12 ГГц (при использовании металлического отражателя). При модификации аналогичным образом состава порошкообразного перлита можно обеспечить снижение с $-7,5...-12,5$ до $-9,5...-14$ дБ значений его коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 8...12 ГГц [34]. Также определено, что с использованием метода химического осаждения металлов из водных растворов можно обеспечивать варьирование экранирующих свойств порошкообразных и волокнистых материалов в оптическом диапазоне длин волн [35].

Список литературы

1. Водосодержащие капиллярно-пористые экраны электромагнитного излучения. Теория и практика / Н.В. Насонова [и др.]. Минск: Бестпринт, 2016. 238 с.
2. Влияние влажности на экранирующие характеристики радиопоглощающих материалов / Н.В. Насонова [и др.] // Вестник ГГТУ. 2013. № 2 (53). С. 86–91.
3. Shielding Properties of Electromagnetic Radiation Absorbers with Geometrical and Structure Heterogeneities / L.M. Lyn'kov [et al.] // Eng. & Tech. J. Part A. 2014. Vol. 32, № 12. P. 2891–2903.
4. Влияние температуры на экранирующие характеристики водосодержащих материалов / Н.В. Насонова [и др.] // Изв. Нац. акад. наук Беларуси. 2013. № 3. С. 117–122.
5. Влагосодержащие экраны для защиты пользователей бытовых и промышленных СВЧ-источников / под ред. Л.М. Лынькова // Биомедицинская радиоэлектроника. 2013. № 4. С. 50–56.
6. Композиционные влагосодержащие структуры для имитации биологической ткани / Т.А. Пулко [и др.] // Биомедицинская радиоэлектроника. 2011. № 3. С. 9–15.
7. Методика оценки воздействия импульсных магнитных полей на ткани организма человека / Н.В. Насонова [и др.] // Приборы. 2014. № 12 (174). С. 45–48.
8. Саванович С.Э., Борботько Т.В. Влияние вязкости водного раствора хлорида натрия, введенного в поры керамзита на его радиопоглощающие свойства // Изв. Нац. акад. наук Беларуси. 2016. № 2. С. 115–119.
9. Саванович С.Э., Борботько Т.В. Влияние размера пор влагосодержащего керамзита на его радиозащитные характеристики // Матер. 13-й Междунар. науч.-техн. конф. «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка». Минск, 16–18 мая, 2018 г. С. 337–339.
10. Богущ В.А. Композиционные влагосодержащие экраны электромагнитного излучения на основе сфагновых мхов // Докл. БГУИР. 2016. № 1 (95). С. 104–106.
11. Богущ В.А. Модифицирование водными растворами углеродосодержащих иглопробивных полотен для экранов электромагнитного излучения // Докл. БГУИР. 2016. № 3 (97). С. 95–98.

12. Молодечкин М.О., Богуш В.А. Методика формирования и характеристики композиционного поглотителя электромагнитного излучения СВЧ-диапазона на основе диоксида титана // Докл. БГУИР. 2015. № 4 (90). С. 109–115.
13. Экран электромагнитного излучения: пат. 9661 Респ. Беларусь / Л.М. Лыньков, О.В. Бойправ, Т.В. Борботько, В.Б. Соколов; дата публ.: 30.10.2013.
14. Бойправ О.В., Лыньков Л.М., Борботько Т.В. Влияние влагосодержания на электродинамические параметры порошкообразного перлита // Изв. Нац. акад. наук Беларуси. 2014. № 4. С. 9–13.
15. Бойправ О.В., Борботько Т.В. Влияние размера фракций влагосодержащего порошкообразного перлита на его значения проводимости // Докл. БГУИР. 2016. № 1 (95). С. 71–75.
16. Бойправ О.В., Лыньков Л.М., Борботько Т.В. Влияние температуры на характеристики отражения и передачи электромагнитного излучения перлитосодержащих экранов // Электронный журнал «Труды МАИ». 2014. № 75.
17. Бойправ О.В., Лыньков Л.М., Борботько Т.В. Экраны электромагнитного излучения на основе влагосодержащего порошкообразного перлита // Вестн. Полоцкого гос. ун-та. 2014. № 11. С. 75–80.
18. Комбинированные материалы для имитации естественных сред в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн для систем защиты информации / Л.М. Лыньков [и др.]. Минск: Бестпринт, 2014. 159 с.
19. Электромагнитные экраны на основе наноструктурированных углеродосодержащих материалов / Е.С. Белоусова [и др.]. Минск: Бестпринт, 2018. 317 с.
20. Пулко Т.А., Айад Х.А.Э., Белоусова Е.С. Влияние состава композиционных покрытий на основе порошкообразного древесного угля на экранирование электромагнитных излучений // Докл. БГУИР. 2016. № 3 (90). С. 103–108.
21. Белоусова Е.С., Мохамед А.М.А., Аль-Адеми Я.Т.А. Гибкие углеродосодержащие поглотители электромагнитного излучения на основе волокнистых материалов // Докл. БГУИР. 2017. № 2 (104). С. 63–68.
22. Бойправ О.В., Белоусова Е.С. Влияние термообработки открытым пламенем перлитосодержащих конструкций экранов на их характеристики отражения и передачи электромагнитного излучения // Докл. БГУИР. 2016. № 6 (100). С. 80–85.
23. Белоусова Е.С., Бойправ О.В., Лыньков Л.М. Композиционные огнестойкие краски с углеродосодержащими компонентами для экранирования электромагнитного излучения // Вестн. Полоцкого гос. ун-та. 2017. № 11. С. 47–51.
24. Гибкие экраны электромагнитного излучения на основе углеродосодержащих клеевых составов / Е.С. Белоусова [и др.] // Докл. БГУИР. 2017. № 8 (110). С. 73–78.
25. Белоусова Е.С., Мохамед А.М.А., Касанин С.Н. Композиционные материалы на основе технического углерода и гидрогеля для скрытия объектов от средств технической разведки // Докл. БГУИР. 2016. № 1 (95). С. 64–70.
26. Белоусова Е.С., Мохамед А.М.А., Лыньков Л.М. Углеродосодержащие бетоны на основе измельченной древесины // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2015. Т. 7, № 3. С. 43–49.
27. Способ изготовления электромагнитного экрана и электромагнитный экран, изготовленный этим способом: пат. 21980 Респ. Беларусь / Л.М. Лыньков, О.В. Бойправ, Е.С. Белоусова, Т.В. Борботько, Д.В. Столер; дата публ.: 30.06.2018.
28. Электромагнитный экран с гиротропными свойствами: пат. 11795 Респ. Беларусь / Л.М. Лыньков, О.В. Бойправ, Н.В. Богуш; дата публ.: 30.10.2018.
29. Boiprav O.V., Lynkou L.M., Mukhurov N.I. Electromagnetic radiation shields based on anodic aluminum oxide // Dokl. BGUIR. 2018. № 7 (117). P. 159–161.
30. Электромагнитный экран на основе анодного оксида алюминия: пат. 11818 Респ. Беларусь / Л.М. Лыньков, О.В. Бойправ, Н.И. Мухуров; дата публ.: 30.10.2018.
31. Экраны электромагнитного излучения на основе магнитных материалов. Технологии. Конструкции. Применения / В.А. Богуш [и др.]. Минск: Бестпринт, 2016. 223 с.
32. Бойправ О.В., Ахмед А.А.А., Лыньков Л.М. Влияние химического осаждения никеля из водных растворов на характеристики отражения и ослабления электромагнитного излучения полиэфирной экранирующей ткани с вложением наноструктурного ферромагнитного микропровода // Докл. БГУИР. 2014. № 7 (85). С. 44–47.
33. Бойправ О.В., Ахмед А.А.А., Лыньков Л.М. Характеристики отражения и передачи электромагнитного излучения полиэфирной экранирующей ткани с вложением наноструктурного ферромагнитного микропровода, содержащей кластеры меди // Докл. БГУИР. 2015. № 3 (89). С. 49–52.
34. Бойправ О.В., Борботько Т.В. Радиопоглощающие свойства никелированного порошкообразного перлита // Вестн. Полоцкого гос. ун-та. 2016. № 3. С. 100–106.
35. Богуш В.А. Оптические свойства волокнистых и порошкообразных материалов с наноструктурированными проводящими покрытиями // Докл. БГУИР. 2016. № 4 (98). С. 93–97.

References

1. Vodosoderzhashhie kapilljarno-poristye jekrany jelektromagnitnogo izluchenija. Teorija i praktika / N.V. Nasonova [i dr.]. Minsk: Bestprint, 2016. 238 s. (in Russ.)

2. Vlijanie vlazhnosti na jekranirujushhie karakteristiki radiopogloshhajushhih materialov / N.V. Nasonova [i dr.] // Vestnik GGTU. 2013. № 2 (53). S. 86–91. (in Russ.)
3. Shielding Properties of Electromagnetic Radiation Absorbers with Geometrical and Structure Heterogeneities / L.M. Lyn'kov [et al.] // Eng. & Tech. J. Part A. 2014. Vol. 32, № 12. P. 2891–2903.
4. Vlijanie temperatury na jekranirujushhie karakteristiki vodosoderzhashhih materialov / N.V. Nasonova [i dr.] // Izv. Nac. akad. nauk Belarusi. 2013. № 3. S. 117–122. (in Russ.)
5. Vlagosoderzhashhie jekrany dlja zashhity pol'zovatelej bytovyh i promyshlennyh SVCh-istochnikov / pod red. L. M. Lyn'kova // Biomedicinskaja radioelektronika. 2013. № 4. S. 50–56. (in Russ.)
6. Kompozicionnye vlagosoderzhashhie struktury dlja imitacii biologicheskoy tkani / T.A. Pulko [i dr.] // Biomedicinskaja radioelektronika. 2011. № 3. S. 9–15. (in Russ.)
7. Metodika ocenki vozdejstvija impul'snyh magnitnyh polej na tkani organizma cheloveka / N.V. Nasonova [i dr.] // Pribory. 2014. № 12 (174). S. 45–48. (in Russ.)
8. Savanovich S.Je., Borbot'ko T.V. Vlijanie vjazkosti vodnogo rastvora hlorida natrija, vvedennogo v pory keramzita na ego radiopogloshhajushhie svojstva // Izv. Nac. akad. nauk Belarusi. 2016. № 2. S. 115–119. (in Russ.)
9. Savanovich S.Je., Borbot'ko T.V. Vlijanie razmera por vlagosoderzhashhego keramzita na ego radiojekranirujushhie karakteristiki // Mater. 13-j Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. «Novye materialy I tehnologii: poroshkovaja metallurgija, kompozicionnye materialy, zashhitnye pokrytija, svarka». Minsk, 16–18 maja, 2018 g. S. 337–339. (in Russ.)
10. Bogush V.A. Kompozicionnye vlagosoderzhashhie jekrany jelektromagnitnogo izluchenija na osnove sfagnovyh mhov // Dokl. BGUIR. 2016. № 1 (95). S. 104–106. (in Russ.)
11. Bogush V.A. Modificirovanie vodnymi rastvorami uglerodosoderzhashhih igloprobivnyh poloten dlja jekranov jelektromagnitnogo izluchenija // Dokl. BGUIR. 2016. № 3 (97). S. 95–98. (in Russ.)
12. Molodechkin M.O., Bogush V.A. Metodika formirovanija i karakteristiki kompozicionnogo poglotitelja jelektromagnitnogo izluchenija SVCh-diapazona na osnove dioksida titana // Dokl. BGUIR. 2015. № 4 (90). S. 109–115. (in Russ.)
13. Jekran jelektromagnitnogo izluchenija: pat. 9661 Resp. Belarus' / L.M. Lyn'kov, O.V. Boiprav, T.V. Borbot'ko, V.B. Sokolov; data publ.: 30.10.2013. (in Russ.)
14. Boiprav O.V., Lyn'kov L.M., Borbot'ko T.V. Vlijanie vlagosoderzhanija na jelektrodinamicheskie parametry poroshkoobraznogo perlita // Izv. Nac. akad. nauk Belarusi. 2014. № 4. S. 9–13. (in Russ.)
15. Boiprav O.V., Borbot'ko T.V. Vlijanie razmera frakcij vlagosoderzhashhego poroshkoobraznogo perlita na ego znachenija provodimosti // Dokl. BGUIR. 2016. № 1 (95). S. 71–75. (in Russ.)
16. Boiprav O.V., Lyn'kov L.M., Borbot'ko T.V. Vlijanie temperatury na karakteristiki otrazhenija i peredachi jelektromagnitnogo izluchenija perlitosoderzhashhih jekranov // Jelektronnyj zhurnal «Trudy MAI». 2014. № 75. (in Russ.)
17. Boiprav O.V., Lyn'kov L.M., Borbot'ko T.V. Jekrany jelektromagnitnogo izluchenija na osnove vlagosoderzhashhego poroshkoobraznogo perlita // Vestn. Polockogo gos. un-ta. 2014. № 11. S. 75–80. (in Russ.)
18. Kombinirovannye materialy dlja imitacii estestvennyh sred v vidimom i infrakrasnom diapazonah dlin voln dlja sistem zashhity informacii / L.M. Lyn'kov [i dr.]. Minsk: Bestprint, 2014. 159 s. (in Russ.)
19. Jelektromagnitnye jekrany na osnove nanostrukturirovannyh uglerodosoderzhashhih materialov / E.S. Belousova [i dr.]. Minsk: Bestprint, 2018. 317 s. (in Russ.)
20. Pulko T.A., Ajad H.A.Je., Belousova E.S. Vlijanie sostava kompozicionnyh pokrytij na osnove poroshkoobraznogo drevesnogo uglja na jekranirovanie jelektromagnitnyh izluchenij // Dokl. BGUIR. 2016. № 3 (90). S. 103–108. (in Russ.)
21. Belousova E.S., Mohamed A.M.A., Al-Ademi Ja.T.A. Gibkie uglerodosoderzhashhie poglotiteli jelektromagnitnogo izluchenija na osnove voloknistyh materialov // Dokl. BGUIR. 2017. № 2 (104). S. 63–68. (in Russ.)
22. Boiprav O.V., Belousova E.S. Vlijanie termoobrabotki otkrytym plamenem perlitosoderzhashhih konstrukcij jekranov na ih karakteristiki otrazhenija i peredachi jelektromagnitnogo izluchenija // Dokl. BGUIR. 2016. № 6 (100). S. 80–85. (in Russ.)
23. Belousova E.S., Boiprav O.V., Lyn'kov L.M. Kompozicionnye ognestojkie kraski s uglerodosoderzhashhimi komponentami dlja jekranirovanija jelektromagnitnogo izluchenija // Vestn. Polotskogo gos. un-ta. 2017. № 11. S. 47–51. (in Russ.)
24. Gibkie jekrany jelektromagnitnogo izluchenija na osnove uglerodosoderzhashhih kleevyh sostavov / E.S. Belousova [i dr.] // Dokl. BGUIR. 2017. № 8 (110). S. 73–78. (in Russ.)
25. Belousova E.S., Mohamed A.M.A., Kasanin S.N. Kompozicionnye materialy na osnove tehničeskogo ugleroda i gidrogelja dlja skrytija ob#ektov ot sredstv tehničeskoy razvedki // Dokl. BGUIR. 2016. № 1 (95). S. 64–70. (in Russ.)
26. Belousova E.S., Mohamed A.M.A., Lyn'kov L.M. Uglerodosoderzhashhie betony na osnove izmel'chennoj drevesiny // Nanotehnologii v stroitel'stve: nauchnyj internet-zhurnal. 2015. T. 7, № 3. S. 43–49. (in Russ.)
27. Spособ izgotovlenija jelektromagnitnogo jekrana i jelektromagnitnyj jekran, izgotovlennyj jetim sposobom:

- pat. 21980 Resp. Belarus' / L.M. Lyn'kov, O.V. Boiprav, E.S. Belousova, T.V. Borbot'ko, D.V. Stoler; data publ.: 30.06.2018. (in Russ.)
28. Jelektromagnitnyj jekran s girotropnymi svojstvami: pat. 11795 Resp. Belarus' / L.M. Lyn'kov, O.V. Boiprav, N.V. Bogush; data publ.: 30.10.2018. (in Russ.)
 29. Boiprav O.V., Lynkou L.M., Mukhurov N.I. Electromagnetic radiation shields based on anodic aluminum oxide // Dokl. BGUIR. 2018. № 7 (117). P. 159–161.
 30. Jelektromagnitnyj jekran na osnove anodnogo oksida aljuminija: pat. 11818 Resp. Belarus' / L.M. Lyn'kov, O.V. Boiprav, N.I. Muhurov; data publ.: 30.10.2018. (in Russ.)
 31. Jekrany jelektromagnitnogo izlucheniya na osnove magnitnyh materialov. Tehnologii. Konstrukcii. Primeneniya / V.A. Bogush [i dr.]. Minsk: Bestprint, 2016. 223 s. (in Russ.)
 32. Boiprav O.V., Ahmed A.A.A., Lyn'kov L.M. Vlijanie himicheskogo osazhdeniya nikelja iz vodnyh rastvorov na harakteristiki otrazheniya i oslableniya jelektromagnitnogo izlucheniya polijefirnoj jekranirujushhej tkani s vlozheniem nanostrukturnogo ferromagnitnogo mikroprovoda // Dokl. BGUIR. 2014. № 7 (85). S. 44–47. (in Russ.)
 33. Boiprav O.V., Ahmed A.A.A., Lyn'kov L.M. Harakteristiki otrazheniya i peredachi jelektromagnitnogo izlucheniya polijefirnoj jekranirujushhej tkani s vlozheniem nanostrukturnogo ferromagnitnogo mikroprovoda, sodержashhej klasteru medi // Dokl. BGUIR. 2015. № 3 (89). S. 49–52. (in Russ.)
 34. Boiprav O.V., Borbot'ko T.V. Radiopogloshhajushhie svojstva nikelirovannogo poroshkoobraznogo perlita // Vestn. Polockogo gos. un-ta. 2016. № 3. S. 100–106. (in Russ.)
 35. Bogush V.A. Opticheskie svojstva voloknistyh i poroshkoobraznyh materialov s nanostrukturirovannyimi provodjashhimi pokrytijami // Dokl. BGUIR. 2016. № 4 (98). S. 93–97. (in Russ.)

Сведения об авторах

Лыньков Л.М., д.т.н., профессор, Почетный профессор БГУИР, заместитель главного редактора научного журнала «Доклады БГУИР».

Богущ В.А., д.ф.-м.н., профессор, ректор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Борбот'ко Т.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Насонова Н.В., д.т.н., доцент, доцент кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Белуцова Е.С., к.т.н., доцент, доцент кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Бойправ О.В., к.т.н., доцент, доцент кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-89-38;
e-mail: leonid@bsuir.by;
Лыньков Леонид Михайлович

Information about the authors

Lynkou L.M., D.Sci, professor, Honorary professor of BSUIR, deputy editor-in-chief of the scientific journal «Doklady BGUIR».

Bogush V.A., D.Sci, professor, rector of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Borbot'ko T.V., D.Sci, professor, head of the department of information protection of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Nasonova N.V., D.Sci, associate professor, associate professor of the department of information protection of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Belousova E.S., PhD, associate professor, associate professor of the department of information protection of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Boiprav O.V., PhD, associate professor, associate professor of the department of information protection of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6
Belarusian state university
of informatics and radioelectronics
phone. +375-17-293-89-38;
e-mail: leonid@bsuir.by;
Lynkou Leonid Mikhailovich

УДК 004.934.2+534.784

ЦИФРОВЫЕ БАНКИ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ЗАДАЧ ОБРАБОТКИ ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ

М.И. ВАШКЕВИЧ, И.С. АЗАРОВ, А.А. ПЕТРОВСКИЙ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 11 февраля 2019

Аннотация. В работе выполнен обзор способов синтеза цифровых банков фильтров, которые могут применяться для решения современных прикладных задач обработки звуковых сигналов. Описывается практический опыт использования цифровых банков фильтров в оригинальных системах обработки звука: музыкальном плеере с функцией повышения разборчивости звучания при прослушивании в шумной акустической обстановке, а также слуховом аппарате на базе смартфона.

Ключевые слова: банк фильтров, субполосная обработка сигналов.

Abstract. The paper reviews techniques of digital filter bank synthesis that can be applied for contemporary speech processing challenges. The paper describes practical experience of using digital filter banks in original systems of sound processing, namely, musical player with noise-aware audio enhancement and hearing aid application for a smartphone.

Keywords: filter bank, subband signal processing.

Doklady BGUIR. 2019, Vol. 120, No. 2, pp. 100-111
Digital filter banks for modern audiosignal processing tasks
M.I. Vashkevich, I.S. Azarov, A.A. Petrovsky

Введение

Свой первый старт и заметное развитие прикладная цифровая фильтрация получила в середине XX века. Первоначально она использовалась как средство моделирования аналоговых схем обработки сигналов с помощью вычислительных машин. Однако примерно в середине 70-х гг. цифровая фильтрация превратилась в самостоятельную область исследований и получила широкое распространение во многих смежных технических областях.

Теория и различные применения цифровой обработки сигналов на протяжении всей своей истории были неразрывно связаны с понятием цифрового фильтра. Это понятие сформировалось как чисто математическое – оператор, который выполняет преобразование цифрового сигнала, для которого справедливы принципы инвариантности к сдвигу и суперпозиции.

К концу 70-х – началу 80-х годов появилась практическая потребность в создании систем, выполняющих декомпозицию сигнала на отдельные частотные составляющие. Система выполняющая разложение сигнала на частотные полосы, получила название банк фильтров [1].

Характерной особенностью банка фильтров является многоскоростная обработка. Это значит, что в разных точках системы частота дискретизации не является одинаковой. Изменение частоты дискретизации выполняется за счет децимации и интерполяции сигнала. Это ключевое отличие банка фильтров от гребенки фильтров, где частота дискретизации сигнала не изменяется.

В настоящее время цифровые банки фильтров получили широкое практическое применение. В частности, стандарты кодирования звука MP3 и AAC используют косинусно-

модулированные банки фильтров. Цифровые банки фильтров также используются в различных системах повышения качества звука, эхо- и шумоподавления, в системах автоматического распознавания речи и модификации голоса [2, 3]. Сфера применения продолжает неуклонно расширяться.

В работе описывается практический опыт авторов в создании оригинальных систем обработки звука на основе цифровых банков фильтров: музыкального плеера с функцией повышения разборчивости звучания при прослушивании в шумной обстановке, а также слухового аппарата на базе смартфона.

Теоретические основы

Рассмотрим общий алгоритм функционирования M -канального банка фильтров. На первом этапе поступивший входной сигнал $x(n)$ раскладывается при помощи банка фильтров анализа на M субполосных составляющих, которые в идеальном случае не перекрываются. Поскольку полученные субполосные сигналы имеют ограниченную полосу частот, для эффективности последующей обработки их децимируют (прореживают). Степень прореживания зависит от цели практического применения.

На втором этапе производят обработку субполосных сигналов. На третьем этапе выполняют восстановление сигнала из субполосных составляющих при помощи банка фильтров синтеза. Операции, выполняемые в секции синтеза, являются обратными по отношению к секции анализа (рис. 1).

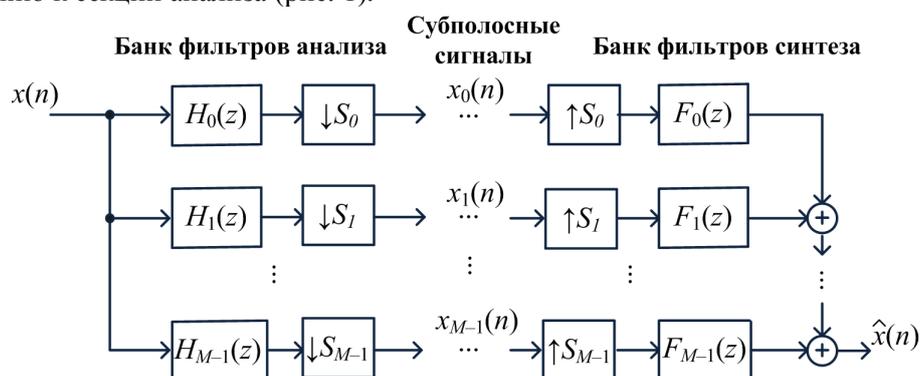


Рис. 1. Общая схема банка фильтров

Большое распространение в инженерной практике получили банки фильтров, основанные на эффекте модуляции. Идея построения банка фильтров заключается в использовании низкочастотного фильтра в качестве прототипа с последующим получением его сдвинутых по частоте версий при помощи модуляции таким образом, чтобы получающийся набор фильтров перекрывал весь частотный диапазон.

В случае использования косинусной модуляции выражения для импульсных характеристик фильтров анализа $h_k(n)$ и синтеза $f_k(n)$ принимают следующий вид [4]:

$$h_k(n) = h(n) \cos\left(\frac{\pi(k+1/2)}{M}\left(n - \frac{N-1}{2}\right) + (-1)^k \frac{\pi}{4}\right), \quad (1)$$

$$f_k(n) = h(n) \cos\left(\frac{\pi(k+1/2)}{M}\left(n - \frac{N-1}{2}\right) - (-1)^k \frac{\pi}{4}\right), \quad (2)$$

где N – порядок фильтра-прототипа, $k=0..M-1$ номер канала, $n=0..N-1$, $h(n)$ – коэффициенты фильтра-прототипа.

Банк фильтров, синтезированный при помощи выражений (1), (2), называется косинусно-модулированным банком фильтров (КМБФ). Схематично амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) фильтра-прототипа и результирующего косинусно-модулированного банка фильтров показаны на рис. 2.

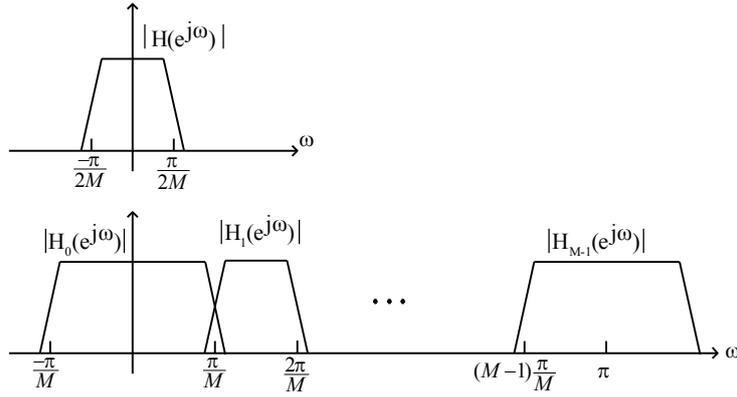


Рис. 2. АЧХ фильтра-прототипа и косинусно-модулированного банка фильтров

Альтернативным образом банк фильтров можно получить, если в качестве модулирующей функции использовать комплексные экспоненты:

$$h_k(n) = h(n)W_M^{-nk}, f_k(n) = h(n)W_M^{nk}, W_M = \exp(j2\pi/M). \quad (3)$$

Банк фильтров, синтезированный при помощи выражений (3), называется ДПФ-модулированным банком фильтров, поскольку комплексные экспоненты являются базисными функциями дискретного преобразования Фурье (ДПФ).

Как известно, процесс децимации и интерполяции сигнала (рис. 1) является нелинейной операцией и может вносить искажения в сигнал (за счет эффекта наложения спектров) [1]. Анализ искажений, возникающих в структуре банка фильтров, проще выполнять в максимально децимированном банке фильтров, когда все $S_k = M$. В этом случае для реконструированного сигнала на выходе банка фильтров можно записать выражение

$$M\hat{X}(z) = X(z)T_0(z) + \sum_{l=1}^{M-1} X(zW_M^l)T_l(z), \quad T_l(z) = \sum_{k=0}^{M-1} F_k(z)H(zW_M^l). \quad (4)$$

где $X(z)$ и $\hat{X}(z)$ – z-образ входного и выходного сигнала соответственно. В выражении (4) $T_0(z)$ характеризует прохождение полезного сигнала через систему анализ/синтез, в то время как оставшиеся компоненты $T_l(z)$ являются передаточными функциями компонент наложения спектров, которые образуются в результате операций децимации/интерполяции в структуре банка фильтров. Для того чтобы система анализ/синтез обладала свойством полного восстановления (англ. perfect reconstruction), необходимо выполнение условий $T_0(z) = z^{-D}$, $T_l(z) = 0$. Однако для банков фильтров, полученных путем модуляции, данные условия практически невыполнимы, поэтому к ним применяют ослабленные требования, а саму систему анализ/синтез на их основе относят к классу систем с почти полным восстановлением (англ. near-perfect reconstruction) [4].

Полифазная реализация банка фильтров

Широкое распространение банков фильтров объясняется наличием вычислительно эффективных алгоритмов их реализации. В качестве примера рассмотрим процесс получения эффективной схемы реализации КМБФ на основе полифазного представления фильтра-прототипа и факторизации матрицы, отвечающей за модуляцию. Для наглядности перепишем в матричном виде выражение для банка фильтров анализа (1) в z-области:

$$\begin{bmatrix} H_0(z) \\ H_1(z) \\ \vdots \\ H_{M-1}(z) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} c(0,0) & c(0,1) & \cdots & c(0,N-1) \\ c(1,0) & c(1,1) & \cdots & c(1,N-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c(M-1,0) & c(M-1,1) & \cdots & c(M-1,N-1) \end{bmatrix}}_{M_c} \cdot \text{diag}(1, z^{-1}, \dots, z^{-N}) \cdot \begin{bmatrix} h(0) \\ h(1) \\ \vdots \\ h(N-1) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $c(k, n)$ – модулирующая функция.

$$c(k, n) = \cos\left(\frac{\pi(k+1/2)}{M}\left(n - \frac{N-1}{2}\right) + (-1)^k \frac{\pi}{4}\right). \quad (6)$$

Анализируя (6), можно заметить, что данная функция является симметричной, и для нее справедливо тождество

$$c(k, l + 2pM) = (-1)^p c(k, l). \quad (7)$$

Далее, используя (7), можно показать, что матрица косинусной модуляции \mathbf{M}_C обладает регулярной структурой:

$$\mathbf{M}_C = \underbrace{[\mathbf{C} \quad -\mathbf{C} \quad \mathbf{C} \quad -\mathbf{C} \quad \dots]}_{m \text{ повторов}} = \mathbf{C} \cdot \underbrace{[\mathbf{I} \quad -\mathbf{I} \quad \mathbf{I} \quad -\mathbf{I} \quad \dots]}_{m \text{ повторов}} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}, \quad (8)$$

где $\mathbf{C} = [c(k, n)]_{0 \leq k < M, 0 \leq n < 2M}$, \mathbf{I} – единичная матрица размера $2M \times 2M$. Факторизация (8) представляет собою запись быстрого алгоритма умножения на матрицу \mathbf{M}_C , в котором число требуемых операций умножения уменьшается в m раз, поскольку для умножения на разреженную матрицу \mathbf{A} требуется только $O(mM)$ операций сложения. Учитывая факторизацию (8), выражение (5) можно переписать в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} H_0(z) \\ H_1(z) \\ \vdots \\ H_{M-1}(z) \end{bmatrix} = \mathbf{C} \cdot \begin{bmatrix} h(0) - z^{-2M} h(2M) + \dots \\ z^{-1} h(1) - z^{-(2M+1)} h(2M+1) + \dots \\ \vdots \\ z^{-(2M-1)} h(2M-1) - z^{-(4M+1)} h(4M-1) + \dots \end{bmatrix} = \mathbf{C} \cdot \begin{bmatrix} \sum_p d_0(p) z^{-2Mp} \\ \sum_p d_1(p) z^{-2Mp} \\ \vdots \\ \sum_p d_{2M-1}(p) z^{-2Mp} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где $d_q(p) = (-1)^p h(q + 2pM)$, $0 \leq q < 2M$, $0 \leq p < m$. В полученном выражении $\sum_p d_k(p) z^{-2Mp}$

являются модифицированными полифазными компонентами фильтра-прототипа, поэтому реализация банка фильтров, основанная на (9), называется полифазной. Дополнительное уменьшение вычислительной сложности КМБФ достигается за счет эффективного способа умножения на матрицу \mathbf{C} , которое может быть выполнено с использованием дискретного косинусного преобразования [5]. Структура полифазной реализации КМБФ показана на рис. 3.

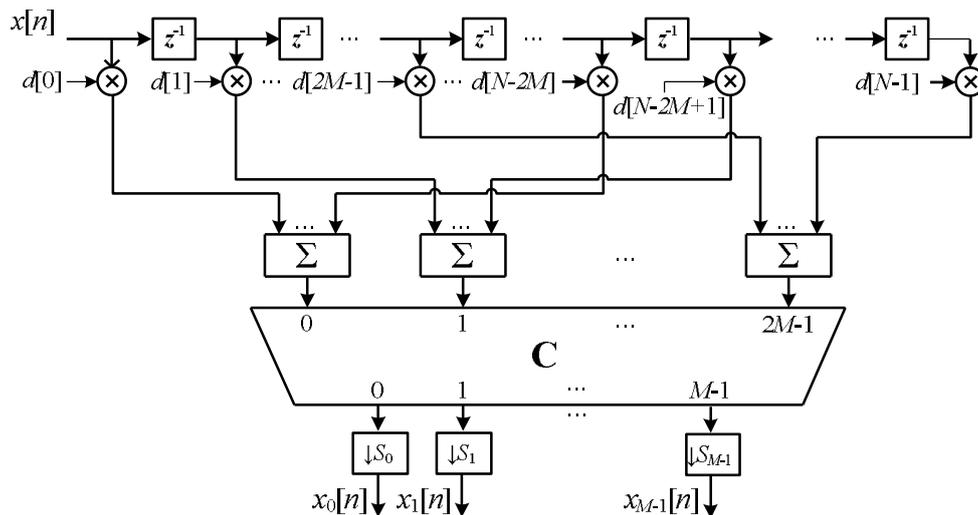


Рис. 3. Полифазная реализация косинусно-модулированного банка фильтров анализа

Привлекательным свойством описанной выше структуры КМБФ является возможность получения на ее основе неравнополосного банка фильтров. Для этого необходимо все элементы задержки в структуре на рис. 3 заменить на фазовые звенья [4]: $A(z) = \frac{\alpha + z^{-1}}{1 + \alpha z^{-1}}$,

$$|\alpha| \leq 1, \quad A(e^{j\omega}) = e^{j\phi(\omega)}, \quad \text{где } \phi(\omega) = -\omega + 2\arctg(\alpha \sin \omega / (\alpha \cos \omega - 1)).$$

Замена $z^{-1} \rightarrow A(z)$ вызывает нелинейное отображение частотной оси $\omega \mapsto \phi(\omega)$, благодаря которому банк фильтров становится неравнополосным. На рис. 4 иллюстрируется эффект нелинейного отображения частотной оси для 5-канального банка.

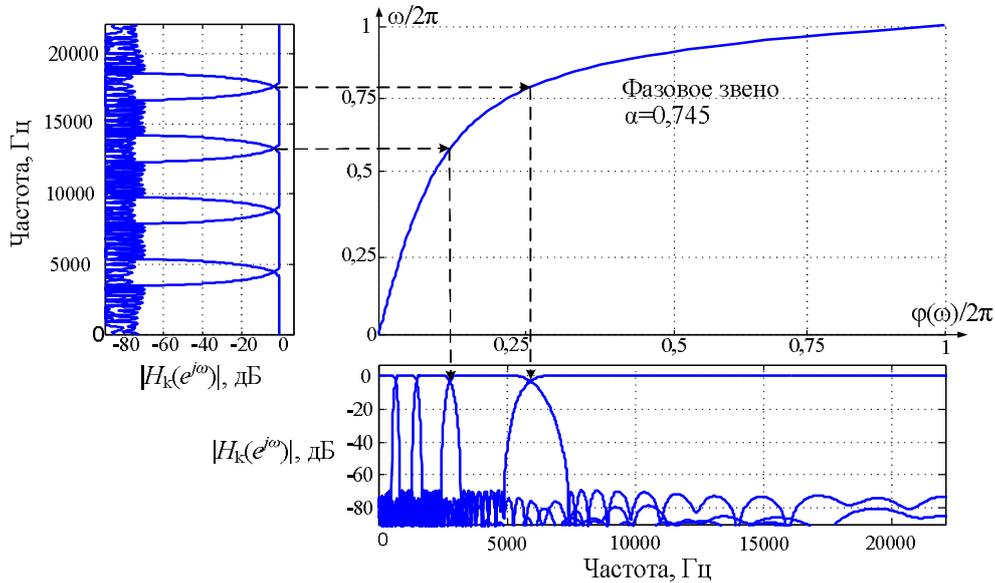


Рис. 4. Формирование неравнополосного банка фильтров (частота дискретизации 44,1 кГц)

Полученная таким образом конструкция банка фильтров имеет значение в области обработки звука, где неравнополосность отражает свойства слуховой системы человека, имеющей различные частотные разрешения в зависимости от высоты воспринимаемого звука. В приведенном примере банк фильтров аппроксимирует психоакустическую шкалу барков. Для банка фильтров также определены коэффициенты децимации/интерполяции $S_k = \{21, 7, 3, 1, 1\}$. Подробности процедуры расчета неравнополосного КМБФ можно найти в [4].

НКМБФ может служить основой для субполосной обработки звука в различных мультимедиа приложениях. Так, в [6, 7] неравнополосный КМБФ используется в системе подавления акустической обратной связи слухового аппарата.

В работе [8] предложена схема обработки сигнала, обеспечивающая повышение разборчивости и натуральности звучания речи и музыки при прослушивании в шумной акустической обстановке. Эффект достигается путем устранения маскирования полезного звукового сигнала нестационарными акустическими шумами при помощи частотно-зависимого адаптивного усиления. Особенностью схемы является то, что для уменьшения нагрузки на слух используется минимальное усиление, достаточное для устранения эффекта маскирования.

Предложенная схема обработки используется неравнополосным КМБФ для декомпозиции сигнала. Далее, с помощью адаптивного компрессора динамического диапазона (АКДД) выполняется усиление каждой частотной полосы сигнала в зависимости от интенсивности шума в этой полосе. На рис. 5 показана предлагаемая схема обработки сигнала.

В схеме имеются два входа: для полезного и шумового сигналов. Оба входных сигнала раскладываются на субполосные составляющие при помощи анализирующего банка фильтров анализа. Для снижения вычислительных затрат отсчеты субполосных сигналов децимируются (прореживаются). Данная операция не приводит к потере полезной информации, поскольку каждый субполосный сигнал имеет узкий частотный диапазон. Для восстановления полезного сигнала применяется банк фильтров синтеза.

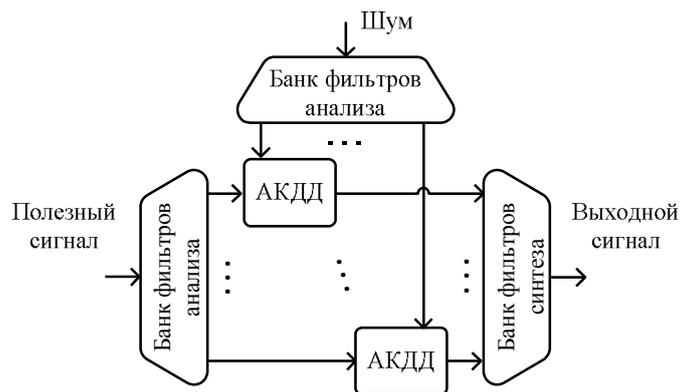


Рис. 5. Схема обработки сигнала для повышения качества его воспроизведения в шумовой обстановке

Для объективной оценки данного способа повышения качества восприятия звукового сигнала предлагается использовать индекс разборчивости речи (ИРР). ИРР является объективной величиной, которая коррелирует с разборчивостью речи в различных неблагоприятных условиях прослушивания. Показатель ИРР варьируется от 0 до 1. Считается, что если ИРР выше 0,75, то разборчивость можно считать хорошей, в то время как значение меньше 0,45 является неудовлетворительным.

Речевой материал для проведения экспериментов заимствован из свободно распространяемой речевой базы CMU ARCTIC. В качестве шумового сигнала выступала запись шума метро, записанная с использованием смартфона. Работа способа проверялась для различных уровней отношений сигнал/шум (ОСШ), во всех случаях измерялась разборчивость речевого сигнала на фоне шума до обработки и после обработки. Результаты проведенных экспериментов отражены на рис. 6.

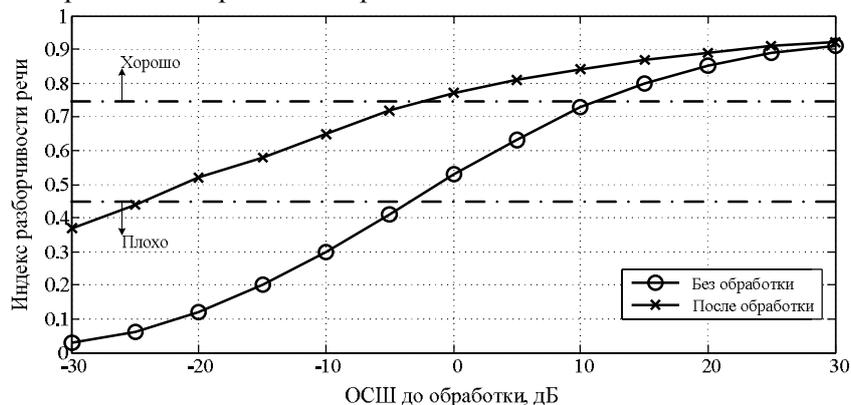


Рис. 6. Сравнение среднего значения ИРР для речевых сигналов до и после обработки предложенным способом

При неблагоприятной шумовой обстановке ($ОСШ < -20$ дБ) способ позволяет получить удовлетворительную разборчивость, а при снижении интенсивности шума ($ОСШ > 0$ дБ) – хорошую. Необработанный сигнал имеет заметно меньшую разборчивость для $ОСШ < 0$ дБ и становится неразборчивым уже при $ОСШ < -10$ дБ. Описанный метод вошел в 100 лучших изобретений России в 2016 году [9].

Реализация банка фильтров методом перекрытия с суммированием

Простым и эффективным методом реализации банка фильтров является метод перекрытия с суммированием, общая идея которого иллюстрируется на рис. 7.

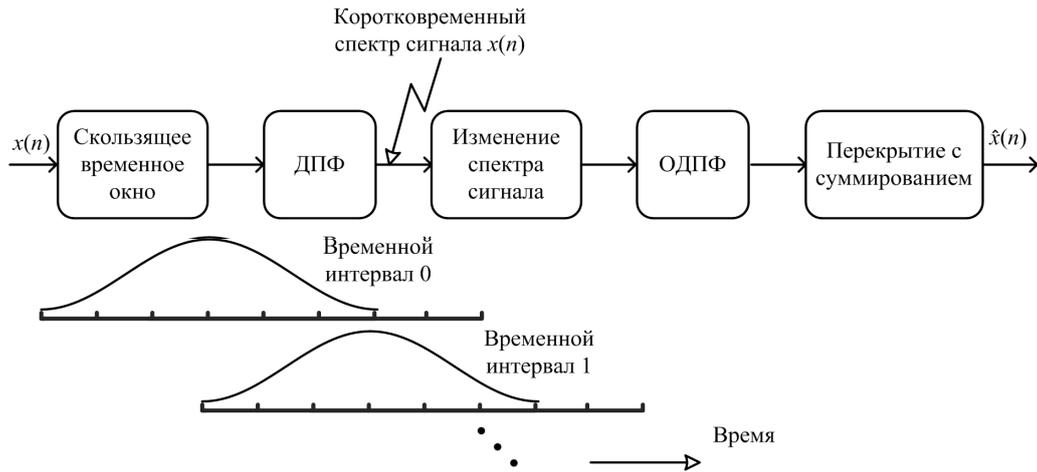


Рис. 7. Принцип работы банка фильтров на основе метода перекрытия с суммированием

Рассмотрим схему реализации M -канального ДПФ-модулированного банка фильтров на основе метода перекрытия с суммированием, при этом будем полагать, что в каналах банка фильтров выполняется децимация/интерполяция с коэффициентом L . В таком случае выражение для выходного сигнала k -го канала банка фильтров анализа будет иметь вид

$$X(k, m) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h(mL - n)x(n)W_M^{-kn}, \quad k = 0, 1, \dots, M - 1, \quad (10)$$

где демпированный временной отсчет m обозначает номер фрейма, а выходной сигнал $X(k, m)$ называют кратковременным спектром сигнала в момент времени $n = mL$. Такое значение $X(k, m)$ связано с тем, что выражение (10) можно интерпретировать, как ДПФ модифицированной последовательности $y(n) = h(mL - n)x(n)$:

$$X(k, m) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} y(n)W_M^{-kn}, \quad k = 0, 1, \dots, M - 1. \quad (11)$$

Выражение для банка фильтров синтеза можно записать в следующем виде:

$$\hat{x}(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} f(mL - n) \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} X(k, m)W_M^{kn}, \quad (12)$$

где $f(n)$ – синтезирующее окно. Упрощенно последовательность операций метода перекрытия с суммированием для анализирующего и синтезирующего банка фильтров показана на рис. 8.

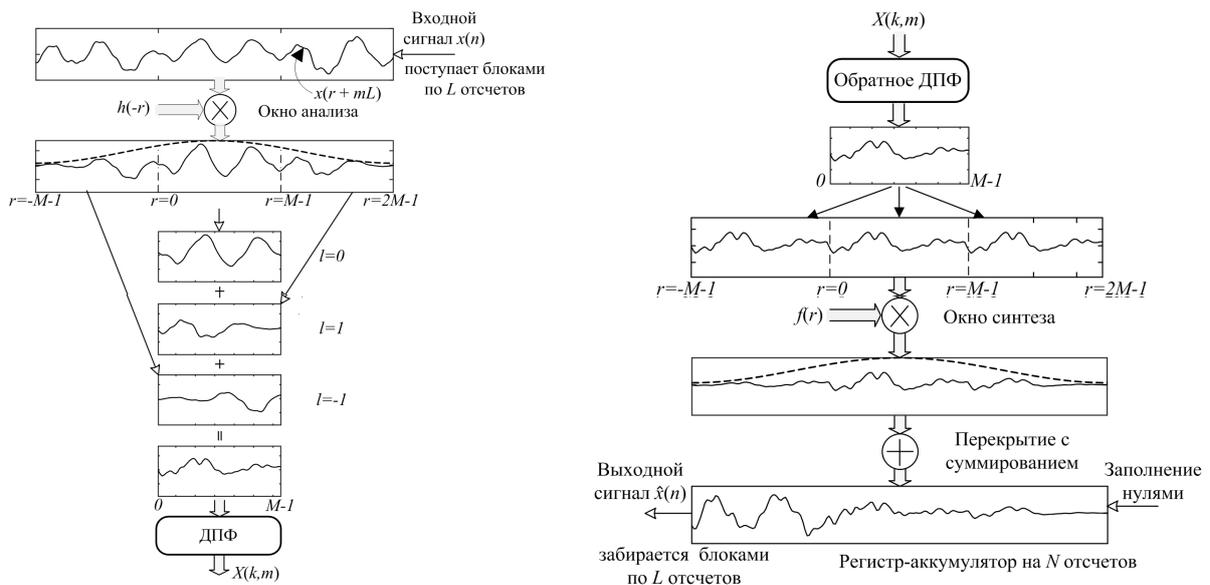


Рис. 8. ДПФ-модулированный банк фильтров на основе метода перекрытия с суммированием

Метод сложения с перекрытием хорошо подходит для систем блочной обработки данных, в том числе мультимедиа систем обработки звука. В частности, этот метод используется в слуховом аппарате на базе смартфона [10, 11], в оценщиках основного тона IRAPT [12] и Halcyon [13].

В слуховом аппарате предполагается, что входной сигнал можно представить в частотной области как сумму чистой речи $X(\omega)$, акустической обратной связи $A(\omega)$ и фонового шума $N(\omega)$:

$$\bar{\bar{X}}(\omega) = X(\omega) + A(\omega) + N(\omega) = \bar{X}(\omega) + N(\omega), \quad (13)$$

где $\bar{X}(\omega) = X(\omega) + A(\omega)$ речевой сигнал с акустической обратной связью. Пусть $R_{\bar{x}}(\omega)$, $R_x(\omega)$, $R_n(\omega)$ спектральные плотности мощности (СПМ) сигналов $X(\omega)$, $A(\omega)$ и $N(\omega)$ соответственно, тогда $\bar{X}(\omega)$ можно оценить из $\bar{\bar{X}}(\omega)$ при помощи подавляющего множителя

$$G_{NR}(\omega) = \sqrt{1 - \frac{R_n(\omega)}{R_{\bar{x}}(\omega)}}. \quad (14)$$

Подавляющий множитель для обратной связи можно получить аналогичным образом:

$$G_{AF}(\omega) = \sqrt{1 - \frac{R_a(\omega)}{R_{\bar{x}}(\omega)}}. \quad (15)$$

В процессе сигнал разделяется на частотные полосы, которые умножаются на подавляющие множители. Схема обработки включает три этапа: 1) подавление шума; 2) подавление обратной акустической связи; 3) компенсация потери слуха, как представлено на рис. 9.

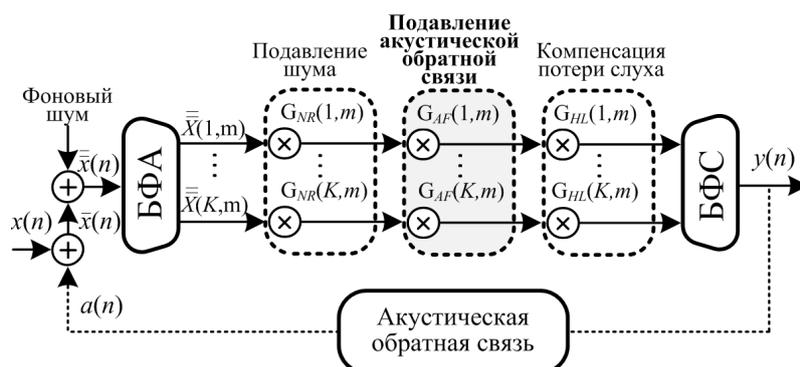


Рис 9. Схема обработки сигнала в слуховом аппарате на базе смартфона

Входной сигнал $\bar{\bar{x}}(n)$ разделяется на узкополосные комплексные сигналы $\bar{\bar{X}}(k, m)$ при помощи банка фильтров анализа (БФА), где k и m – частотный и временной индекс соответственно, а обработанный выходной сигнал восстанавливается при помощи банка фильтров синтеза (БФС). Вычисление коэффициентов для подавления шума $G_{NR}(k, m)$ требует оценки СПМ шума, которая вычисляется путем усреднения амплитудных значений сигнала в каждой полосе. Для того чтобы сделать оценку СПМ более стабильной, соседние полосы объединяются. Коэффициенты для подавления акустической обратной связи $G_{AF}(k, m)$ вычисляются на основании оценки СПМ сигнала обратной связи. На последнем этапе обработки субполосные сигналы умножаются на коэффициенты $G_{HL}(k, m)$, компенсирующие потерю слуха.

Система обработки сигнала реализована на смартфоне iPhone и персональном компьютере. В обеих реализациях используется частота дискретизации 44,1 кГц и размер кадра $N = 511$ с 50 % перекрытием. Сигнал захватывается аудиосистемой блоками размером $L = 255$, что соответствует общей задержке обработки 5,8 мс.

Результаты подавления шума имеют хорошие показатели в терминах сегментного отношения сигнал-шум (СОСШ). Для тестов использовались шумы трех различных типов

с исходным СОСШ в пределах $[-5, 10]$ дБ. В эксперименте использовано пять мужских и женских голосов длительностью более 40 с. В табл. 1 приведены полученные оценки повышения СОСШ в результате обработки для каждого из трех шумов.

Таблица 1. Повышение СОСШ для шумов различного типа

Входной СОСШ, дБ	Белый шум	Шум кафетерия	Шум дорожного движения
-5	9,81	6,04	6,64
0	7,87	4,03	4,43
5	6,13	2,36	2,68
10	4,59	0,91	1,31

На рис. 10 показана реакция алгоритма к резким изменениям интенсивности шума. Рис. 10 (б) – речевой сигнал, смешанный с шумом уличного движения, который появляется со 2-й секунды. Алгоритм реагирует на шум менее чем за 2 с после возникновения шума.

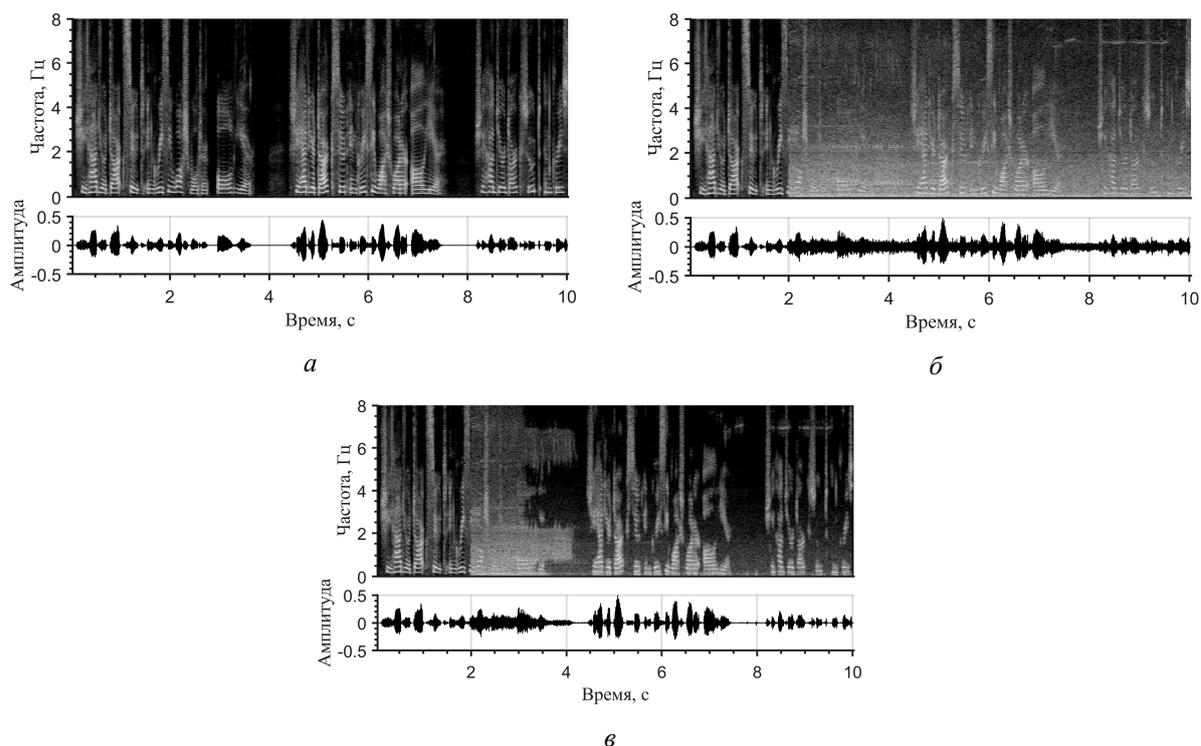


Рис. 10 Подавление шума в слуховом аппарате на базе смартфона: *а* – чистая речь, *б* – зашумленная речь (шум появляется на 2-й секунде); *в* – зашумленная речь после обработки

Эффективность подавления акустической обратной связи также проверена путем практических и модельных экспериментов. В одном из экспериментов использовалась цифровая модель пути распространения обратной связи на базе фильтра с конечной импульсной характеристикой из 279 коэффициентов. Частотная характеристика фильтра показана на рис. 11. Использовался общий коэффициент компенсации потери $G_{HL}(k, m)$ слуха для всех субполос.

Сначала определялось максимальное усиление, достижимое без возникновения эффекта обратной связи без ее подавления. Затем определялось дополнительное усиление, которое можно достичь за счет подавления эффекта обратной связи. В табл. 2 приведены полученные результаты для двух алгоритмов подавления – алгоритма наименьших квадратов (LMS) и предложенного алгоритма ('НС' означает нестабильность системы).

Предложенный алгоритм подавления обеспечивает намного более высокое СОСШ по сравнению с алгоритмом LMS во всех испытанных условиях и сохраняет стабильность системы вплоть до добавочного усиления 24 дБ.

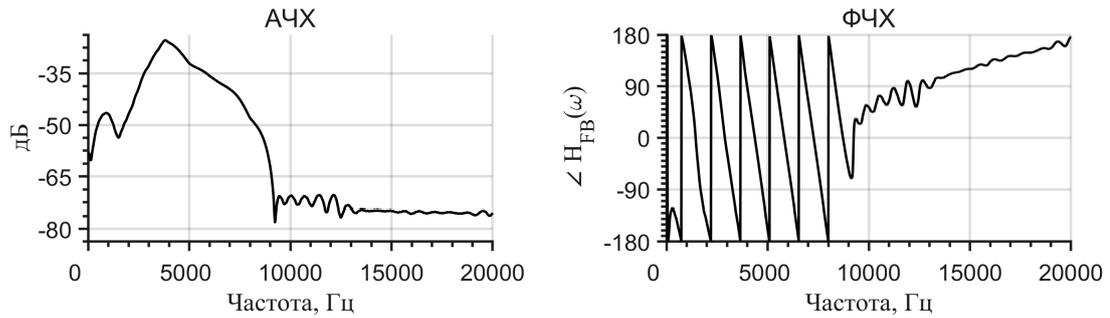


Рис. 11. Частотная характеристика модели пути распространения акустической обратной связи

Таблица 2. СОСШ, полученное при подавлении акустической обратной связи различными алгоритмами

ΔG , дБ	Без подавления, дБ	LMS, дБ	Предложенный алгоритм, дБ
0	8,12	17,66	12,27
4	НС	5,57	11,94
8	НС	5,35	11,10
12	НС	3,18	10,22
16	НС	1,72	9,25
20	НС	НС	7,59
24	НС	НС	4,56

Одновременное использование предложенных алгоритмов подавления фонового шума и акустической обратной связи дополнительно увеличивает СОСШ за счет ослабления остатков обратной связи.

Выводы

Цифровые банки фильтров являются мощным, эффективным и гибким инструментом обработки звука, позволяющим создавать оригинальные мультимедиа системы. На основе имеющейся методологии вычислительный процесс многоканальной фильтрации может быть организован эффективным образом практически на любой вычислительной платформе. Эффективность реализации позволяет использовать портативные мультимедиа устройства с низким энергопотреблением наряду с производительными вычислительными системами. Опыт практического применения доказывает возможность создания сложных систем с субполосной обработкой звука, работающих в реальном масштабе времени на современных портативных устройствах.

Список литературы

1. Анализаторы речевых и звуковых сигналов: методы, алгоритмы и практика (с MATLAB примерами) / под ред. А.А. Петровского. Минск: Бестпринт, 2009. 456 с.
2. Изменение частоты основного тона речевого сигнала на основе гармонической модели с нестационарными параметрами / И.С. Азаров [и др.] // Труды СПИИРАН. 2014. Вып. 32. С. 5–26.
3. Azarov E., Vashkevich M., Petrovsky A. GUSLAR: A framework for automated singing voice correction // Proc. IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing (ICASSP). Florence, Italy, 4–9 May 2014. P. 7969–7973.
4. Вашкевич М.И., Азаров И.С., Петровский А.А. Косинусно-модулированные банки фильтров с фазовым преобразованием: реализация и применение в слуховых аппаратах. М.: Горячая линия-Телеком, 2014. 210 с.
5. Вашкевич М.И., Петровский А.А. Алгебраический метод синтеза быстрых алгоритмов дискретного косинусного преобразования произвольного размера // Автоматика и вычислительная техника. 2012. № 5. С. 48–57.
6. Vashkevich M., Azarov E., Petrovsky A. Low-delay hearing aid based on cochlear model with nonuniform subband acoustic feedback cancellation // Proc. EUSIPCO'12. Bucharest, Romania, 27–31 August 2012. P. 514–518.

7. Вашкевич М.И., Азаров И.С., Петровский А.А. Подавление эффекта акустической обратной связи в слуховых аппаратах с использованием неравнополосного банка фильтров // Информатика. 2012. № 2 (34). С. 50–60.
8. General-purpose listening enhancement based on subband non-linear amplification with psychoacoustic criterion / E. Azarov [et al.] // 138-th Audio Engineering Society Convention (AES'138), Warsaw, Poland 7–10 May, 2015. (Convention paper 9265).
9. Способ повышения разборчивости и информативности звуковых сигналов в шумовой обстановке: пат. № 2589298 Росс. Федер. / М.И. Вашкевич, И.С. Азаров, А.Ю. Бредихин, А.А. Петровский; опубл. 10.07.2016.
10. Vashkevich M., Azarov E., Petrovsky A. Real-time implementation of hearing aid with combined noise and acoustic feedback reduction based on smartphone // Proc. IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing (ICASSP). New Orleans, USA, 5–9 March 2017. P. 6570–6571.
11. Petralex: A smartphone-based real-time digital hearing aid with combined noise reduction and acoustic feedback suppression / M. Vashkevich [et al.] // Proc. of International Conference Signal Processing Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA'2017). Poznan, Poland 20–22 September 2017. P. 249–254.
12. Azarov E., Vashkevich M., Petrovsky A. Instantaneous pitch estimation based on RAPT framework // Proc. EUSIPCO'12. Bucharest, Romania, 27–31 August 2012. P. 2787–2791.
13. Azarov E., Vashkevich M., Petrovsky A. Instantaneous pitch estimation algorithm based on multirate sampling // Proc. IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing (ICASSP). Shanghai, China, May 20–25 2016. P. 4970–4974.

References

1. Аналізатори речеви́х і звукови́х сигналів: методи, алгоритми і практика (с MATLAB приєрами) / под ред. А.А. Петровського. Мінськ: Bestprint, 2009. 456 с. (in Russ.)
2. Изменение частоты основного тона речевого сигнала на основе гармонической модели с нестационарными параметрами / I.S. Azarov [i dr.] // Trudy SPIIRAN. 2014. Vyp. 32. S. 5–26. (in Russ.)
3. Azarov E., Vashkevich M., Petrovsky A. GUSLAR: A framework for automated singing voice correction // Proc. IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing (ICASSP). Florence, Italy, 4–9 May 2014. P. 7969–7973.
4. Vashkevich M.I., Azarov I.S., Petrovskij A.A. Kosinusno-modulirovannye banki fil'trov s fazovym preobrazovaniem: realizacija i primenenie v sluhovyh apparatah. M. : Gorjachaja linija-Telekom, 2014. 210 s. (in Russ.)
5. Vashkevich M.I., Petrovskij A.A. Algebraicheskiy metod sinteza bystryh algoritmov diskretnogo kosinusnogo preobrazovanija proizvol'nogo razmera // Avtomatika i vychislitel'naja tehnika. 2012. № 5. S. 48–57. (in Russ.)
6. Vashkevich M., Azarov E., Petrovsky A. Low-delay hearing aid based on cochlear model with nonuniform subband acoustic feedback cancellation // Proc. EUSIPCO'12. Bucharest, Romania, 27–31 August 2012. P. 514–518.
7. Vashkevich M.I., Azarov I.S., Petrovskij A.A. Podavlenie jeffekta akusticheskoj obratnoj svjazi v sluhovyh apparatah s ispol'zovaniem neravropolosnogo banka fil'trov // Informatika. 2012. № 2 (34). S. 50–60.
8. General-purpose listening enhancement based on subband non-linear amplification with psychoacoustic criterion / E. Azarov [et al.] // 138-th Audio Engineering Society Convention (AES'138), Warsaw, Poland 7–10 May, 2015. (Convention paper 9265).
9. Sposob povyshenija razborchivosti i informativnosti zvukovyh signalov v shumovoj obstanovke: pat. № 2589298 Ross. Feder. / M.I. Vashkevich, I.S. Azarov, A.Ju. Bredihin, A.A. Petrovskij; opubl. 10.07.2016. (in Russ.)
10. Vashkevich M., Azarov E., Petrovsky A. Real-time implementation of hearing aid with combined noise and acoustic feedback reduction based on smartphone // Proc. IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing (ICASSP). New Orleans, USA, 5–9 March 2017. P. 6570–6571.
11. Petralex: A smartphone-based real-time digital hearing aid with combined noise reduction and acoustic feedback suppression / M. Vashkevich [et al.] // Proc. of International Conference Signal Processing Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA'2017). Poznan, Poland 20–22 September 2017. P. 249–254.
12. Azarov E., Vashkevich M., Petrovsky A. Instantaneous pitch estimation based on RAPT framework // Proc. EUSIPCO'12. Bucharest, Romania, 27–31 August 2012. P. 2787–2791.
13. Azarov E., Vashkevich M., Petrovsky A. Instantaneous pitch estimation algorithm based on multirate sampling // Proc. IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing (ICASSP). Shanghai, China, May 20–25 2016. P. 4970–4974.

Сведения об авторах

Вашкевич М.И., к.т.н., доцент кафедры электронных вычислительных средств Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Азаров И.С., д.т.н., доцент, заведующий кафедрой электронных вычислительных средств Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Петровский А.А., д.т.н., профессор кафедры электронных вычислительных средств Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-88-05;
e-mail: vashkevich@bsuir.by
Вашкевич Максим Иосифович

Information about the authors

Vashkevich M.I., PhD, associate professor of computer engineering department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Azarov I.S., D.Sci, head of the computer engineering department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Petrovsky A.A. D.Sci, professor of the computer engineering department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovky st., 6
Belarussian state university
of informatics and radioelectronics
tel. +375-17-293-88-05;
e-mail: vashkevich@bsuir.by
Vashkevich Maksim Iosifovich

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ ЖУРНАЛА «ДОКЛАДЫ БГУИР»

1. К публикации принимаются статьи, отражающие результаты оригинальных научно-технических исследований и разработок, не опубликованные и не предназначенные для опубликования в других изданиях. Ответственность за оригинальность и достоверность материалов, поданных в печать, несут авторы. Тематика представляемой статьи должна соответствовать рубрикам журнала (электроника, радиофизика, радиотехника, информатика).

2. Статьи, представляемые в редакцию, должны содержать:

- индекс УДК, соответствующий тематике;
- название на русском и английском языках;
- фамилии и инициалы авторов на русском и английском языках;
- полное название учреждений, в которых выполнялось исследование;
- аннотацию на русском и английском языках (рекомендуемый объем до 500 печатных знаков);
- ключевые слова (до 10 слов) на русском и английском языках;
- сведения об авторах на русском и английском языках, включающие в себя их фамилии, имена, отчества, ученые степени и звания, занимаемые должности; адрес для корреспонденции на русском и английском языках, e-mail, номер телефона.

Рекомендуется стандартизировать текст статьи, используя подзаголовки «Введение», «Теоретический анализ», «Методика», «Экспериментальная часть», «Результаты и их обсуждение», «Заключение», «Список литературы». Список литературы следует оформлять в соответствии с ГОСТ 7.05-2008. Названия источников на русском языке необходимо дублировать в соответствии с правилами транслитерации.

3. Для регистрации статьи в редакцию журнала подаются следующие документы: 2 экземпляра статьи в бумажном варианте, распечатанных на листах формата А4, и в электронном варианте в виде файла формата MS Word (расширение – *.doc). Также необходимо представить экспертное заключение о возможности опубликования материалов в печати.

Объем оригинальной статьи – не более 7 страниц, краткого сообщения – не более 4 страниц без учета сведений об авторах.

4. При наборе текста используется гарнитура Times New Roman и Symbol, кегль – 11 pt. Устанавливаемый размер бумаги – А4 (210×297 мм). Поля слева, справа, сверху и снизу – по 25 мм. Межстрочный интервал – 1,0. Абзацный отступ – 1,25 см. Запрещается при наборе текста использовать гиперссылки, маркированные списки и ручные переносы слов.

5. Формульные выражения выполняются только в редакторе формул MathType, стиль – «Математика» («Math»), гарнитура – Times New Roman и Symbol, кегль – 11 pt. Как в тексте статьи, так и в формульных выражениях, математические функции, цифры, буквы греческого и русского алфавитов набираются прямым начертанием, латинские буквы – курсивом. Нумеровать рекомендуется те формульные выражения, на которые имеются ссылки в последующем тексте, заключая при этом номер в круглые скобки.

6. Рисунки выполняются в соответствии со следующими требованиями: размер рисунка – не более 15×20 см, разрешение – не менее 300 dpi; рисунок должен быть оформлен как графический объект; подрисуночные подписи обязательно должны включать в себя номер и название рисунка.

Словесных обозначений на рисунках рекомендуется избегать, используя при этом цифровые либо буквенные обозначения, пояснения к которым следует давать в тексте статьи либо подрисуночных подписях; цифровые и буквенные обозначения на рисунках по начертанию и размеру должны соответствовать обозначениям в тексте статьи либо подрисуночных подписях.

7. Наименования, обозначения, определения и правила применения единиц физических величин, употребляемых в статье, должны соответствовать ГОСТ 8.417–2002.

8. Ссылки на литературные источники нумеруются в порядке их цитирования в тексте. Номера ссылок заключаются в квадратные скобки.

9. Набор статьи необходимо выполнять в шаблоне, доступном для скачивания на электронной странице журнала (www.doklady.bsuir.by → раздел «Авторам»).

10. Очередность опубликования статей определяется датой их регистрации в редакции и прохождением процедуры рецензирования. Адрес для пересылки статей в электронном варианте и переписки с редакцией: doklady@bsuir.by.