

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

На правах рукописи

УДК 621.377.6.037

КОРАБЕЛЬНИКОВ
Егор Андреевич

**МЕТОДЫ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ВЕРИФИКАЦИИ
ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ**

АВТОРЕФЕРАТ
магистерской диссертации на соискание степени
магистра технических наук

по специальности 1-41 80 01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах»

Научный руководитель
канд.техн.наук, доцент
Стемпицкий В.Р.

Минск 2019

Работа выполнена на кафедре микро- и нанoeлектроники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель:

Стемпичкий Виктор Романович,
кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент:

Бойправ Ольга Владимировна,
кандидат технических наук, доцент кафедры защиты информации учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Защита диссертации состоится 29 января 2019 г. года в 9⁰⁰ часов на заседании Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, Минск, ул. П. Бровки, 6, 1 уч. корп., ауд. 114, тел.: 293-89-26, e-mail: kafme@bsuir.by.

ВВЕДЕНИЕ

Микроэлектронное производство является одно из самых быстро развивающихся и дорогих отраслей. Соответственно производители всеми возможными способами пытаются повысить качество, снизить себестоимость и повысить процент выхода годных микросхем.

Статистический анализ является одним из ключевых методов обработки данных, получаемых как на этапе моделирования, так и в процессе производства. Однако его проведение зачастую требует высококвалифицированных специалистов и дорогостоящего программного обеспечения, что могут позволить себе не все компании.

Экономический рост является важнейшей характеристикой общественного производства при любых хозяйственных системах. Экономический рост – это наиболее полное выражение количественного и качественного совершенствования общественного производства за определенный период времени.

В связи с трудностями измерения всего процесса экономического развития в макроэкономике чаще всего анализируют экономический рост, хотя это лишь один из критериев экономического развития. Экономический рост есть важнейшая составляющая экономического развития. Но быстрый или, наоборот, нулевой и даже отрицательный экономический рост не всегда говорит о быстром экономическом развитии или экономической деградации. Для этого требуется дополнительный специальный анализ.

Экономический рост в настоящее время является наиболее часто применяемым критерием экономического развития, который может измеряться как в натуральном, так и в стоимостном выражении.

Экономический рост в настоящее время является наиболее часто применяемым критерием экономического развития, который может измеряться как в натуральном, так и в стоимостном выражении. Первый способ позволяет исключить влияние инфляции, но не позволяет получить обобщающий показатель экономического роста. Недостатками второго такого способа являются невозможность полностью избежать влияния инфляции, а также проблемы структурных и качественных изменений в материальных и человеческих факторах производства. Тем не менее именно стоимостные показатели в основном используются во всем мире при измерении, анализе и моделировании процессов экономического роста.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В современном микроэлектронном производстве статический ана-

лиз используется на различных этапах производства.

При моделирование технологических процессов требуются большие затраты компьютерного времени. Однако для некоторых моделей может быть проведена аппроксимация, по результатам которой можно проводить более быстрое моделирование и оптимизацию параметров.

На этапе контроля процесса производства с оборудования могут сниматься различные показатели (напряжение питания, температура, вибрации, токи и т.д.), которые могут быть проверены на наличие корреляции между собой. Так же анализируя изменение измеряемых показателей во времени можно выявить наличие неучтенных динамически изменяемых показателей.

На этапе анализа результатов производства может производиться поиск самих различных корреляций. Например, наличие связи между выходом годных и работающими на производстве сотрудниками.

На основе анализа данных полученных в процессе экспликации изделий (выход из строя, обращения в ремонт) могут корректироваться гарантийные и эксплуатационные сроки.

Степень разработанности проблемы

Теоретические основы статистического анализа были заложены довольно давно. Одним из лучших русскоязычных справочников по методам статистического анализа можно считать книгу Кобзаря А. И. «Прикладная математическая статистика».

Применение статистического анализа именно применительно к области микроэлектроники рассмотрено в монографии В. Р. Стемпицкого «Статистическое проектирование и оптимизация производственных процессов в микроэлектронике и микробиологии» и в книге Белоус А. И. «Полупроводниковая силовая электроника».

Однако на текущий момент литература предполагает либо только теоретические изыскания в этой области, либо требует довольно хорошей математической подготовки, либо предполагает использование платных программных продуктов.

Цель и задачи исследования

Целью диссертации является разработка бесплатного программного продукта, упрощающего проведение статистического анализа в микроэлектронике и не требующего глубоких математических знаний.

Для выполнения поставленной цели в работе были сформулированы следующие задачи:

–проанализировать основные задачи, решаемые статистическим анализом в микроэлектронике и выявить основные методы, используемые в нем;

–провести анализ существующих средств статистического анализа;

–провести анализ существующих средств разработки, позволяющих создавать программы статистической обработки.

–разработать программный продукт, реализующий функционал, позволяющий провести статистический анализ данных;

–провести анализ данных с помощью разработанного программного продукта, тем самым проведя проверку его работоспособности.

Объектом исследования является статистический анализ данных в микроэлектронике.

Предметом работы данные, получаемые в процессе микроэлектронного производства, подлежащие статистическому анализу.

Область исследования. Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-41 80 01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Теоретическая и методологическая основа исследования

Разработанные методы, алгоритмы и программное обеспечение, используемые при поиске оптимальных значений коэффициентов моделей и значений режимов технологических операций основаны на применении математических методов аппроксимации и оптимизации.

Для разработки программного обеспечения использовался язык программирования Python совместно с библиотекой графического интерфейса PyQt.

Информационная база исследования для проведения анализа сформирована на основе экспериментальных данных, предоставленных ОАО «ИНТЕГРАЛ» и результатов компьютерного моделирования.

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке эффективной методики верификации параметров моделей технологических операций микроэлектроники, реализованных в специальном программном обеспечении.

Основные положения, выносимые на защиту

Уточнение параметров и коэффициентов моделей описания технологического маршрута изготовления n-МОП-транзистора с 0,35 мкм проектными нормами, выполненное методами аппроксимации экспериментальных данных и оптимизации, обеспечивает уменьшение максимальных значений относительных отклонений результатов моделирования электрических и конструктивных характеристик формируемого прибора с 21 до 5 % по сравнению с данными натуральных измерений.

Результаты исследования представлены и опубликованы в тезисах в рамках докладов на 53-й научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (2017 г.) и научно-техническая школа-конференция БНТУ «Нанотехнологии и наноматериалы, интеллектуальные и сенсорные системы» (2018 г.).

Теоретическая значимость диссертации заключается в разработке эффективной методики верификации параметров моделей технологических операций микроэлектроники.

Практическая значимость диссертации состоит в разработке специ-

ального программного обеспечения, предназначенного для верификации параметров моделей технологических операций микроэлектроники.

Структура и объем работы. Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, трёх глав и заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем диссертации – 63 страницы. Работа содержит 12 таблиц, 26 рисунков. Библиографический список включает 90 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлена актуальность и важность проведения исследований в области оптимизации и верификации параметров моделей приборно-технологического проектирования интегральных микросхем, определены основные направления исследований, сформулированы цели и задачи работы.

В первой главе рассмотрена проблема оптимизации и верификации параметров моделей приборно-технологического проектирования интегральных микросхем, описаны современные подходы к проектированию интегральных микросхем с учетом статистических разбросов параметров технологического процесса, проанализированы проблемы верификации программных средств проектирования технологических процессов микроэлектроники.

Во второй главе рассмотрены методы и программные средства оптимизации и верификации параметров моделей полупроводниковых приборов, включая комплексный подход к реализации иерархического проектирования интегральных микросхем с учетом статистических разбросов режимов технологических операций; функциональные возможности программного комплекса компании Silvaco и его основных модулей; описаны методики верификации и адаптации параметров моделей переноса носителей заряда в МОП-транзисторах, а также математические методы ее реализации. Представлено описание возможностей программного комплекса UniStat.

В третьей главе представлены результаты оптимизации и верификации характеристик n-МОП-транзистора с 0,35 мкм проектными нормами, включающие данные верификации параметров моделей технологических операций имплантации и диффузии; результаты оптимизации режимов технологического процесса изготовления и электрических характеристик 0,35 мкм n МОП-транзистора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведения научных исследований по теме магистерской диссертации получены следующие основные результаты.

1. Показано, что достижение высокого выхода годных изделий, предсказуемости результатов проектирования технологических процессов изготовления, приборных структур, схемотехнических решений возможно только посредством учета влияния статистических флуктуаций параметров технологии на выходные характеристики прибора/схемы/ системы, включая верификацию используемых средств проектирования к конкретной производственной среде.

2. Анализ современных процессов проектирования и производства изделий микроэлектроники, сложность и комплексность моделей, используемых при описании физических характеристик на различных этапах проектирования, указывает на необходимость повышения прогнозируемости результатов моделирования за счет внедрения эффективных методов верификации (калибровки) специального программного обеспечения на основе экспериментальных данных.

3. Разработанные методы, алгоритмы и программное обеспечение, основанные на применении математических методов аппроксимации и оптимизации, использованные при поиске оптимальных значений режимов технологических операций изготовления n-МОП-транзистора с 0,35 мкм проектными нормами, обеспечивают соответствие результатов моделирования выходных характеристик технологического процесса и электрических характеристик приборной структуры данным экспериментальных измерений с относительной погрешностью, не превышающей 5 %.

4. Результаты исследований были использованы в рамках выполнения заданий 3.1.01, 3.1.02 и 3.2.01 Государственной программы научных исследований «Фотоника, опто- и микроэлектроника».