

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
“БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ”

УДК 621.382.002

СТЕПНИЦКИЙ ВИКТОР РОМАНОВИЧ

**СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ
ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ
МИКРОСХЕМ МЕТОДОМ ПОВЕРХНОСТИ ОТКЛИКОВ**

05.27.01 “Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,
микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах”

АВТОРЕФЕРАТ

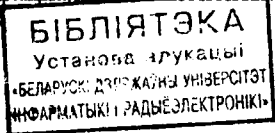
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Минск, 2004

Работа выполнена в Учреждении образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники”.

Научный руководитель: д.ф.-м.н., с.н.с., Нелаев В.В.
(БГУИР, кафедра микроэлектроники).

Официальные оппоненты:



д.т.н., профессор, Лыньков Л.М.
(БГУИР, кафедра защиты информации);

к.т.н., доцент, Хижняк А.В.
(Учреждение образования “Военная академия Республики Беларусь”, кафедра электроники).

Оппонирующая организация: Государственное научное учреждение
“Институт физики твердого тела и полупроводников НАН Б”

Защита диссертации состоится 18 ноября 2004 года в 14 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при Учреждении образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники” (220013, Минск, ул. П. Бровки, 6; ауд. 232, тел. 239 89 89)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники”.

Автореферат разослан “15” октября 2004 года

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Резкое повышение сложности интегральных микросхем (ИМС), стоимости их разработки и жесткая рыночная конкуренция приводит к необходимости повышения качества и сокращения сроков проектирования новых изделий. В связи с этим важна и актуальна задача разработки новых эффективных методов и программных средств, используемых на всех составных этапах проектирования технологии/прибора/схемы.

Поскольку современные предприятия электронной промышленности оснащены высокопрецизионным оборудованием, реализация технологии изготовления ИМС становится отработанной процедурой. Поэтому главной на повестке дня нынешнего этапа развития микроэлектроники является проблема качественного и оперативного проектирования в среде виртуального производства (Virtual Wafer Fabrication, VWF). При этом разрабатываемые изделия должны быть не только всесторонне проверены в обычном цикле проектирования технологии/прибора/схемы, но и адаптированы к конкретной производственной среде, а также оптимизированы с точки зрения выхода годных изделий. Такой подход называется “проектированием на технологичность” (Design For Manufacturability, DFM).

Важным и необходимым этапом в современном производственном цикле изготовления ИМС является проведение статистического анализа результатов компьютерного проектирования и экспериментальной отработки технологии/прибора/схемы, а также оптимизации технологии с целью повышения выхода годных изделий и технологичности маршрута изготовления. Наличие сертификата на проведение статистического анализа технологии изготовления нового изделия является в настоящее время необходимым условием деятельности предприятий электронной промышленности.

Следует отметить, что прямой статистический анализ в цикле Монте-Карло и оптимизация технологии изготовления ИМС с использованием стандартных пакетов проектирования требует значительных вычислительных и временных ресурсов. Отработка технологии в условиях опытно-промышленного производства связана с колоссальными материальными, энергетическими затратами.

Если в состав большинства программ для проектирования прибора/схемы традиционно входят блоки статистического анализа, то для систем проектирования технологии такие инструменты активно разрабатываются только в последнее десятилетие. Однако в них реализована лишь ограниченная часть аспектов статистического анализа и оптимизации технологии изготовления ИМС.

Таким образом, актуальность и перспективность исследований, связанных с решением проблемы проектирования современных изделий микроэлектроники в среде реального и виртуального производства, определяют важность научных и прикладных разработок в области статистического анализа и оптимизации технологии изготовления ИМС. Решение указанных проблем особенно актуально для предприятий электронной промышленности Республики Беларусь.

Существенной проблемой проектирования изделий микроэлектроники, особенно для мелких и средних предприятий, является высокая стоимость и, как следствие, ограниченная доступность современного программного обеспечения для проектирования ИМС. Кроме того, отсутствие возможности овладения и использования современных и полнофункциональных средств проектирования ИМС ощутимо сказывается на уровне подготовки и квалификации специалистов-разработчиков ИМС.

В связи с этим разработка концепции проектирования и обучения в сети Интернет и ее реализация посредством создания соответствующей аппаратно-программной платформы, позволяет осуществить процесс работы над одним проектом коллективами разработчиков, разделенными в пространстве, и расширяет доступ к современным программным средствам как для проектирования, так и для обучения.

Связь работы с крупными научными программами, темами. Работа выполнена в рамках республиканских и международных научно-технических программ, а также грантов Министерства Образования РБ: *ГБЦ 01-3052* “Разработать программное обеспечение для статистического проектирования технологии в микроэлектронике и обучения на основе Интернет технологии в рамках совместных научных исследований между БГУИР и Варшавским университетом технологий”, задание Министерства образования РБ; *Х/Д 02-1009* “Научные исследования и обучение в области проектирования систем на кристаллах”, в рамках проекта IST-2000-30193 REASON (Research and Training Action for System and Chip Design) программы Европейского Сообщества IST (Information Society Technologies); *ГБЦ 99-8009* “Разработать программное обеспечение для многомерного статистического проектирования субмикронных технологических процессов микроэлектроники”, проект в рамках ГНТП “Информатика”; *ГБЦ 99-3131* “Апробировать в условиях опытно-промышленного производства разработанное программное обеспечение для статистического проектирования технологии ИМС”, грант Министерства образования РБ; *ГБЦ 00-3149* “Разработать методику и программное обеспечение для решения задачи планирования компьютерного эксперимента в статистическом моделировании технологии СБИС”, грант Министерства образования РБ; *ГБЦ 01-3093* “Разработать методику и программное обеспечение для оптимизации параметров технологического процесса производства ИМС в статистическом проектировании технологии СБИС”, грант Министерства образования РБ.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является установление методом поверхности откликов математических связей между технологическими параметрами и выходными характеристиками технологии/схемы, а также разработка методов, алгоритмов и программных средств для статистического анализа и оптимизации процесса изготовления ИМС.

Для достижения указанной цели предполагается решить следующие задачи:

1. Разработать методы, алгоритмы и программное обеспечение для проведения статистического, в цикле Монте-Карло, анализа влияния флуктуаций технологических параметров на выходные характеристики результатов проектирования технологии изготовления ИМС.

2. Разработать методы оптимизации технологических параметров, которая заключается в определении допустимого разброса технологических параметров, обеспечивающего изменение выходных характеристик технологии/прибора/схемы в заданном диапазоне.

3. Провести проверку эффективности разработанных методов, алгоритмов и программного обеспечения для статистического анализа и оптимизации технологии изготовления ИМС с использованием результатов компьютерных и натуральных экспериментов по формированию ИМС.

4. Разработать методику и программные средства для проектирования технологии изготовления ИМС в сети Интернет/Интранет.

Объект и предмет исследования. В соответствии с поставленной задачей объектом исследования выбраны технологические процессы формирования структурных

элементов приборов микроэлектроники. Предметом исследования выбраны связи между входными параметрами и выходными характеристиками технологических процессов формирования ИМС.

Методология и методы проведенного исследования. Для реализации указанных целей и задач использованы:

- метод поверхности откликов, включающий методы оптимального планирования эксперимента, статистической обработки, аппроксимации, условной и безусловной оптимизации результатов компьютерных и натуральных экспериментов;
- экспериментальные методы получения тонких пленок, осаждения легированных и нелегированных слоев поликристаллического кремния, а также технологии изготовления МОП-транзисторов;
- экспериментальные методы измерения и расчетные методы экстракции SPICE-параметров приборов;
- алгоритмы и программы для проектирования технологии формирования ИМС;
- программные средства для реализации статистического анализа, проектирования и обучения в сети Интернет/Инtranет.

Научная новизна и значимость полученных результатов:

1. Разработан комплексный подход к решению задачи многофакторного статистического анализа технологии изготовления ИМС с использованием метода поверхности отклика, отличающийся:

- учетом влияния флуктуаций параметров технологического процесса на характеристики прибора/схемы;
- определением допустимого разброса технологических параметров, обеспечивающего отклонение выходных характеристик прибора/схемы в заданном диапазоне.

2. Разработана методология аппроксимации результатов компьютерных и натуральных экспериментов, отличающаяся использованием полиномов Чебышева и позволяющая получить точность аппроксимации, в несколько раз превышающую результаты, получаемые с применением традиционных методов, например, метода наименьших квадратов.

3. Разработана методика анализа результатов экспериментов, состоящая в последовательном применении процедур сглаживания (экспоненциального и движущейся медианы) и позволяющая исключить влияние отдельных неверно заданных или некорректно полученных данных на результаты статистического анализа.

4. На основе метода покоординатного спуска разработан эффективный алгоритм решения задачи условной оптимизации, позволяющий определять не только минимум и максимум исследуемой функции, но и осуществлять поиск оптимального разброса технологических параметров при заданных границах изменения выходной характеристики.

Практическая значимость полученных результатов определяется актуальностью решенных задач, методами, алгоритмами и программным обеспечением, разработанными в рамках выполненных исследований.

1. Предложенные и исследованные на работоспособность методики, алгоритмы и программное обеспечение для проведения статистического анализа и оптимизации параметров технологии изготовления ИМС позволяют решать задачи размерностью до нескольких десятков значимых факторов.

2. Решение задачи создания эффективных методов, алгоритмов и программного

обеспечения для статистического анализа и оптимизации расширяет возможности существующих программ физического моделирования и проектирования технологии изготовления ИМС, обеспечивая сокращение в несколько раз сроков создания, повышение точности проектирования и выхода годных изделий.

3. Разработанные методы, алгоритмы и программное обеспечение использованы в научных исследованиях института физико-органической химии НАН Б, а также внедрены в опытно-промышленное производство в НИКТП “Белмикросистемы” для статистического анализа и оптимизации технологии изготовления ИМС.

4. Впервые сформулированный обобщенный алгоритм и разработанный комплекс программных средств для проектирования в сети Интернет/Интранет позволяет реализовать концепцию виртуального производства ИМС.

Научные и практические результаты выполненных исследований используются в лекционных курсах и специализированных лабораторных практикумах учебных заведений Республики Беларусь (БГУИР, БГУ, БНТУ), Российской Федерации (Владимирский технический университет), Украины (Львовская Национальная Политехника) и Республики Польша (Варшавский университет технологий), а также при проведении научных исследований в рамках международного проекта REASON (IST-2000-30193). Web-сайт с программно-аппаратным комплексом для проектирования, статистического анализа, оптимизации и обучения технологии изготовления ИМС размещен в сети Интернет (<http://www.bsuir.edu.by/icts>; <http://icts.by.ru>).

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Разработанные методики, алгоритмы и программное обеспечение для проведения статистического анализа и оптимизации параметров технологии формирования ИМС, основанные на использовании метода поверхности откликов, позволяют учитывать влияние флуктуаций технологических параметров, а также определять допустимый разброс технологических параметров, обеспечивающий отклонение выходных характеристик прибора/схемы в заданном диапазоне.

2. Использование ортогональных полиномов Чебышева для аппроксимации нелинейных зависимостей в натуральных и компьютерных экспериментах позволяет получить точность аппроксимации, в несколько раз превышающую результаты, получаемые стандартными методами, а применение различных методик сглаживания при анализе результатов экспериментов позволяет исключать влияние неверно заданных или некорректно полученных данных на результаты проектирования.

3. Результаты статистической обработки и оптимизации натуральных экспериментов, проведенных в условиях опытно-промышленного производства, и компьютерных экспериментов по моделированию технологии изготовления ИМС подтверждают работоспособность разработанных методов и алгоритмов для решения задач при проектировании и отработке технологических процессов изготовления различных компонентов ИМС. Относительная погрешность прогнозируемых результатов не превышает десяти процентов.

4. Разработанный программно-аппаратный комплекс, основанный на использовании современных методов программирования и специальных программных средств, позволяет реализовать концепцию виртуального производства ИМС, включая проектирование, статистический анализ и оптимизацию технологии изготовления ИМС в сети Интернет/Интранет.

Личный вклад соискателя. Содержание диссертации отражает личный вклад автора, заключающийся в разработке и тестировании методов, алгоритмов и программного обеспечения, используемых для статистического анализа и оптимизации

и оптимизации технологии изготовления ИМС, а также в интерпретации и обобщении результатов, полученных при проведении компьютерных и натуральных экспериментов. Вклад научного руководителя В.В. Неласва связан с постановкой задач и целей исследований, совместной разработкой методов и алгоритмов, а также обсуждением промежуточных и конечных результатов. Вклад А.А. Кулешова заключается в идеологической постановке развитых методов анализа некорректных экспериментов и в совместной проверке полученных результатов статистической обработки экспериментальных данных. Вклад В.С. Малышева состоит в предоставлении экспериментальных данных и совместном обсуждении результатов их статистической обработки. Диссертационная работа выполнена в рамках заочной аспирантуры БГУИР. Вклад остальных соавторов заключается в совместной интерпретации и обсуждении полученных результатов.

Апробация результатов диссертации. Материалы, вошедшие в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на различных республиканских и международных научно-технических конференциях: “Научно-методические проблемы совершенствования подготовки специалистов”, Минск (1998); “Nondestructive Testing and Computer Simulation”, Россия, Санкт-Петербург, Россия (1999, 2000, 2001, 2002); “Современные проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств”, Новополоцк, ПГУ (2000, 2002); “Вузovская наука, промышленность, международное сотрудничество”, Минск, БГУ (2000); “Проблемы и пути развития высшего технического образования”, Минск, БГУИР (2001); “Современные средства связи”, Беларусь, Минск-Нарочь (2001, 2002); “Телематика и непрерывное образование”, Украина, Киев (2001); “Mixed Design of Integrated Circuits and Systems”, Poland, (2002, 2003, 2004); “Новые технологии изготовления многокристалльных модулей”, Минск, БГУИР (2002, 2004); “Дистанционное обучение – образовательная среда XI века”, Минск, БГУИР, (2001, 2002, 2003); “CAD Systems in Microelectronics”, Украина, Львов-Славское (2003), “Informatics, Mathematical Modeling and Design”, Россия, Владимир (2004).

Опубликованность результатов. По материалам диссертации опубликовано 5 статей в научно-технических журналах, 4 статьи в научно-технических сборниках, 17 статей в сборниках научных трудов конференций, 1 тезисы доклада в сборниках тезисов конференций. Общий объем опубликованных работ составляет 105 страниц.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, списка использованных источников и двух приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 147 страниц, из которых 100 страниц машинописного текста. Она включает 57 рисунков на 26 страницах, 14 таблиц на 7 страницах, библиографию из 125 наименований на 9 страницах и 2 приложения на 25 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В общей характеристике работы определено основное направление, обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задача работы, изложены основные положения, выносимые на защиту, охарактеризована научная новизна, научная и практическая значимость полученных в работе результатов.

В первой главе описаны методы статистического анализа технологии ИМС, а также методы аппроксимации результатов экспериментов.

Показано, что статистический анализ и оптимизация технологии/прибо-

ра/схемы являются важными и необходимыми этапами в современном процессе проектирования интегральных микросхем.

Отмечена недостаточная эффективность проведения статистического анализа посредством использования прямых компьютерных расчетов в цикле Монте-Карло, поскольку это связано с большими временными и материальными затратами, а результаты, полученные в таком подходе, не всегда адекватно описывают процессы, происходящие в исследуемом объекте.

На основании проведенного анализа существующих методов статистической обработки компьютерных и натуральных экспериментов сделан вывод об использовании аппроксимационных зависимостей этих результатов как наиболее эффективном способе проведения статистических исследований в цикле Монте-Карло.

Рассмотрены методы аппроксимации результатов экспериментов с использованием сплайнов, а также в приближении двухуровневой коррекции эвристических алгоритмов распознавания образов. Сделан вывод о необходимости использования в статистических расчетах технологии ИМС более универсальных и эффективных по требуемым вычислительным ресурсам методов аппроксимации результатов компьютерного моделирования и натуральных экспериментов.

Во второй главе рассмотрены методы и алгоритмы, используемые для решения задачи статистического анализа и оптимизации с использованием метода поверхности откликов (МПО).

Проведен анализ существующих методов оптимального планирования натуральных и компьютерных экспериментов, необходимых для построения адекватных математических моделей исследуемых процессов. Описаны критерии оптимальности планов эксперимента. Рассмотрены основные планы для полиномиальных моделей первого и второго порядка, приведены методики их построения. Проведен сравнительный анализ планов второго порядка, на основании которого предложены планы на кубе и на шаре как наиболее эффективные для практического использования.

Предложена методика аппроксимации результатов компьютерных и натуральных экспериментов, основанная на использовании ортогональных полиномов Чебышева.

Описана разработанная методика статистического анализа некорректных результатов эксперимента, содержащих ошибки и погрешности во входных параметрах или выходных характеристиках. Исследована ситуация, когда одинаковому набору входных параметров соответствует несколько разных значений выходной характеристики.

Исследованы подходы, используемые для оптимизации параметров технологии формирования ИМС. Рассмотрены методы решения задачи условной и безусловной оптимизации (нулевого, первого и второго порядка). Сформулированы основные задачи, требующие решения в процессе оптимизации технологических параметров ИМС. Сделан вывод об ограниченности стандартных методов оптимизации, направленных в основном, на поиск минимума/максимума исследуемой функции.

В качестве основы метода решения задачи статистического анализа и оптимизации технологии ИМС выбран метод поверхности отклика как наиболее эффективный из всех исследованных. Использование МПО позволяет решить принципиальную проблему, связанную с большими вычислительными затратами, необходимыми для осуществления процедуры оптимизации параметров посредством статистического анализа в цикле Монте-Карло результатов численного моделирования в совместном цикле проектирования технологии/прибора/схемы. МПО чрезвычайно экономичен при исследовании чувствительностей параметров технологического процес-

са/прибора/схемы посредством аппроксимации сложных зависимостей между ними (например, между пороговым напряжением МОП транзистора и дозами, энергиями имплантации легирующих примесей в подложку, области кармана, канала, стока, истока, затвора и параметрами высокотемпературных обработок при его формировании). Это особенно важно для тех случаев, когда отсутствуют адекватные физические модели, устанавливающих соотношения между, например, разгонкой примесей в p-кармане и высоким уровнем инжекции на p-n-переходе.

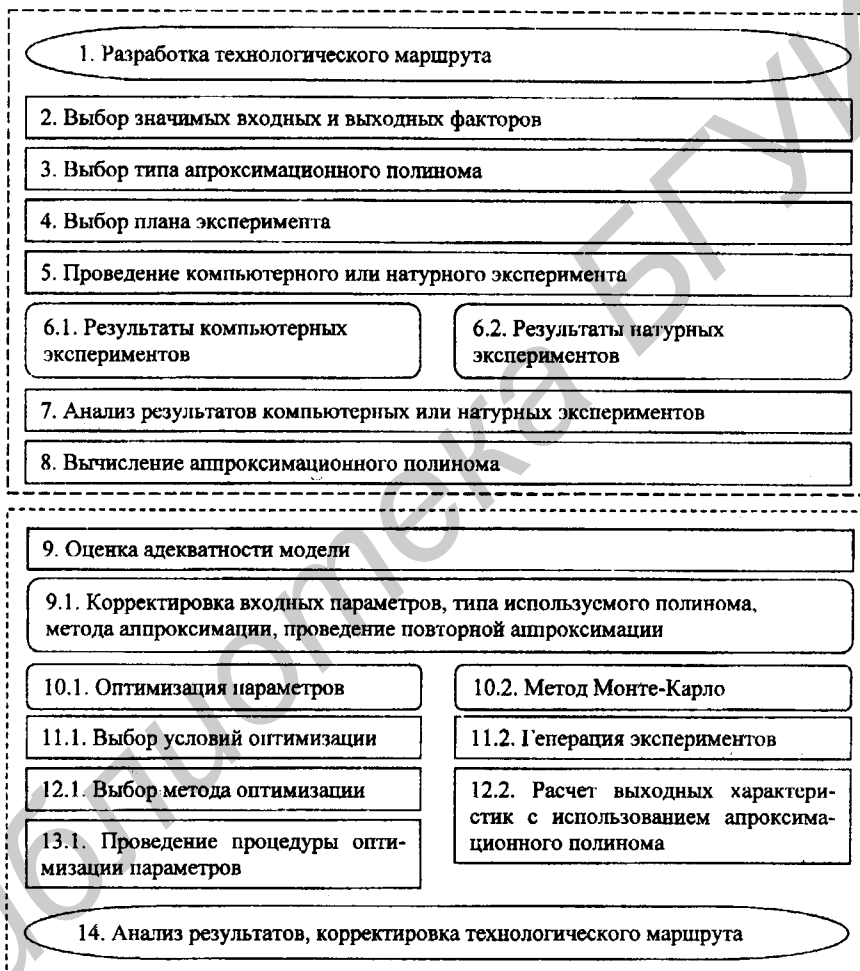


Рис. 1. Блок-схема программы реализации задачи многофакторного статистического проектирования и оптимизации технологии ИМС

Разработаны методика и алгоритм, позволяющие получить решение общей задачи оптимизации, включая определение разброса выходных характеристик прибо-

ра/схемы в зависимости от заданного диапазона флуктуаций входных параметров (прямая задача) и расчет допустимого разброса входных параметров, обеспечивающего изменение выходных характеристик технологии/прибора/схемы в заданном диапазоне (обратная задача).

Блок-схема программы реализации задачи многофакторного статистического проектирования и оптимизации технологии ИМС представлена на рис. 1. Общий алгоритм решения задачи состоит из двух основных частей. Первая часть (этапы 1-8) – блок реализации МПО для расчета коэффициентов полинома, адекватно аппроксимирующего результаты моделирования технологического маршрута при любом количестве входных технологических параметров во всем заданном диапазоне их возможных изменений. Вторая часть – блок оптимизации параметров, а также анализа результатов и корректировки технологических параметров (этапы 9-14).

Первый шаг алгоритма (этап 1 на рис. 1) состоит в разработке технологического маршрута.

После разработки технологического маршрута формирования ИМС на этапе 2 выбираются значимые входные факторы, которые в наибольшей степени влияют на выходные характеристики, а также устанавливается дополнительная информация, необходимая для проведения расчетов:

- номинальные значения и диапазоны (в абсолютных значениях или в процентах) измененных значимых входных факторов (технологических параметров);
- выходные характеристики (измеренные или рассчитанные технологические и SPICE-параметры);

Затем осуществляется выбор типа аппроксимирующего полинома (этап 3). На этапе 4 составляется план экспериментов, которые проводятся на этапе 5.

С использованием результатов компьютерных (этап 6.1) или натуральных экспериментов (этап 6.2) на этапе 7 проводится анализ полученных данных на наличие случайных ошибок. На этапе 8 рассчитываются коэффициенты полинома, аппроксимирующего зависимость выходных характеристик (результатов технологического моделирования или расчета электрических характеристик прибора/схемы) от входных параметров. Оценка статистических критериев (Фишера, Стьюдента, Кохрена и др.) адекватности аппроксимирующего полинома, а также значимостей коэффициентов полинома проводятся на этапе 9. При необходимости (этап 9.1) в процедуру аппроксимации вносятся изменения (корректировка входных параметров, типа используемого полинома) и этапы 7-9 проводятся еще раз.

Этапы 10-13 предназначены для оптимизации технологических параметров посредством проведения статистических расчетов в цикле Монте-Карло (этапы 10.2, 11.2, 12.2) с использованием полученного аппроксимирующего полинома (безусловная оптимизация). Альтернативная процедура оптимизации (этапы 10.1, 11.1, 12.1, 13.1) заключается в решении задачи определения допустимого диапазона значений входных технологических параметров, обеспечивающих изменение выходных характеристик прибора/схемы внутри заданного интервала (условная оптимизация).

На заключительном этапе проводится анализ результатов и, если необходимо, корректировка технологического маршрута.

В третьей главе приведены результаты статистического анализа и оптимизации технологии ИМС с целью исследования точности и эффективности разработанных методов и алгоритмов.

Проведено сравнение результатов компьютерного моделирования биполярной и КМОП технологий с результатами их статистического анализа и оптимизации. Мо-

делирование биполярной технологии осуществлялось с использованием программы Suprem II, а КМОП технологии – с использованием программы SYPRUS.

В качестве значимых параметров технологии формирования биполярного транзистора выбраны:

- доза и энергия имплантации мышьяка при формировании скрытого слоя;
- температура окисления при формировании маски перед легированием области базы;
- концентрация поверхностного источника при диффузионном легировании области базы;
- температура процесса диффузионного легирования области базы;
- концентрация поверхностного источника при диффузионном легировании области эмиттера;
- температура процесса диффузионного легирования области эмиттера;

Аналогичная процедура реализована и для статистического анализа результатов моделирования стандартной КМОП технологии с использованием программы SYPRUS. В этих расчетах в качестве значимых технологических параметров КМОП технологии были выбраны:

- доза имплантации фосфора (бора) при формировании кармана р(п)МОП транзистора;
- температура окисления при формировании подзатворного диэлектрика;
- доза имплантируемых примесей фосфора (бора) при легировании канала;
- длительность окислительного процесса при формировании подзатворного диэлектрика;
- концентрация примесей фосфора в подложке.

В табл. 1 приведены сравнительные результаты статистического анализа указанных двух серий расчетов.

Таблица 1

Результаты статистического анализа компьютерных экспериментов по моделированию технологии формирования структуры и электрических параметров приборов ИМС

Выходные параметры	Suprem II	Выходные параметры	SYPRUS
	MaxΔ=(МПО-SUP)/МПО, %		MaxΔ=(МПО-SYP)/МПО, %
d_E , мкм	2,4	V_{TON} , В	2,81
d_B , мкм	3,9	K_{PN}	0,47
d_C , мкм	3,0	V_{TOP} , В	0,49
ρ_E , Ом/кв.	3,1	K_{PP}	0,46
ρ_B , Ом/кв.	4,6	V_{TON1} , В	2,12
ρ_C , Ом/кв.	2,4	K_{PN1}	0,47

Здесь d_E , d_B , d_C и ρ_E , ρ_B , ρ_C – соответственно глубины залегания р-п-переходов и слоевые сопротивления эмиттера, базы и коллектора биполярного транзистора; а V_{TON} , K_{PN} ; V_{TOP} , K_{PP} и V_{TON1} , K_{PN1} – соответственно пороговые напряжения и $KAPPA$ (SPICE-параметры) пМОП и рМОП транзисторов. MaxΔ – максимальное значение разницы в процентах между результатами численного моделирования (по программам Suprem II или SYPRUS) и результатами, полученными с использованием МПО.

Результаты, представленные в табл. 1, подтверждают эффективность МПО, ис-

пользованного для аппроксимации данных компьютерных экспериментов.

Проведен статистический анализ и оптимизация параметров КМОП технологии (натурные эксперименты) с использованием данных, полученных в НИКТП "Белмикросистемы" НПО "Интеграл" в процессе отработки технологии изготовления пМОП и рМОП транзисторов.

В качестве значимых технологических параметров, оказывающих наибольшее влияние на выходные характеристики прибора, были выбраны:

- доза имплантации бора $D_{n,W}$ при создании кармана;
- доза имплантации фосфора $D_{n,D}$ при создании области стока;
- доза имплантации бора D_C при подлегировании канала.

В качестве выходной характеристики исследовалось пороговое напряжение $V_{T,n}$ пМОП транзисторов.

На рис. 2 приведена корреляционная зависимость между измеренными значениями порогового напряжения $V_{T,n}$ и соответствующими результатами аппроксимации с использованием МПО. Наихудшее различие между этими результатами составляет 8 %, что свидетельствует о приемлемой точности аппроксимации.

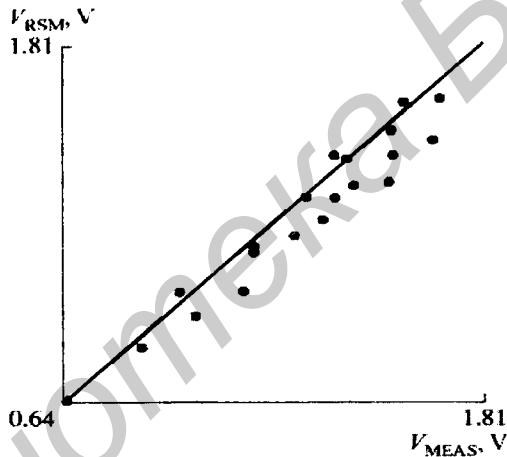


Рис. 2. Корреляционная зависимость между измеренными значениями порогового напряжения $V_{T,n}$ и результатами аппроксимации

Типичные результаты оптимизации технологических параметров (доз имплантации $D_{n,W}$, $D_{n,D}$ и D_C) с точки зрения обеспечения изменения порогового напряжения $V_{T,n}$ в пределах 10 % для трех его номинальных значений 0,7, 1,2 и 1,7 В приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты оптимизации параметров технологии изготовления МОП транзисторов (доз имплантации $D_{n,W}$, $D_{n,D}$ и D_C)

Входные параметры	Интервал экспериментальных значений доз	Интервал доз, полученных в результате оптимизации, для интервалов изменения $V_{T,n}$, В		
		0,7±0,07	1,2±0,12	1,7±0,17
$D_{n,W}$, см ⁻²	4,6·10 ¹² ...9,2·10 ¹²	4,60·10 ¹² ...6,69·10 ¹²	4,60·10 ¹² ...9,20·10 ¹²	5,40·10 ¹² ...4,60·10 ¹²
$D_{n,D}$, см ⁻²	3,0·10 ¹³ ...4,5·10 ¹³	3,40·10 ¹³ ...4,50·10 ¹³	1,50·10 ¹³ ...4,50·10 ¹³	1,50·10 ¹³ ...4,50·10 ¹³
D_C , см ⁻²	0,5·10 ¹² ...1,5·10 ¹²	0,51·10 ¹² ...0,78·10 ¹²	0,51·10 ¹² ...1,50·10 ¹²	1,01·10 ¹² ...1,50·10 ¹²

Из данных, приведенных в табл. 2, можно сделать вывод, что дозы $D_{n,w}$ и D_C являются более значимыми технологическими параметрами, чем доза $D_{n,D}$. Полученные данные могут быть использованы в качестве рекомендаций при выборе оптимальных технологических параметров процесса изготовления МОП структур в реальных условиях опытно-промышленного производства.

С использованием ММПО проведен статистический анализ и оптимизация натурного эксперимента, проведенного в Институте физико-органической химии НАН Б, для получения оптимального состава трехкомпонентной жидкостекольной композиции, предназначенной для планаризации топологического рельефа при формировании межуровневого диэлектрика.

Состав композиции: тетраэтоксисилан (ТЭОС), триметилсилилфосфат (ТМФ), полипропиленгликоль (ППГ) и спиртовой растворитель.

Решены задачи аппроксимации зависимости толщины пленки d от состава композиции и определения диапазонов изменения каждого из составляющих компонентов, обеспечивающих получение толщины пленки в заданном интервале ее разбросов.

Анализ результатов построения аппроксимационной зависимости толщины пленки d от процентного содержания ТЭОС, ППГ и ТМФ (соответственно факторы X_1 , X_2 и X_3) показал, что эта зависимость сугубо нелинейна, что обусловило построение искомой функции в виде полинома Чебышева.

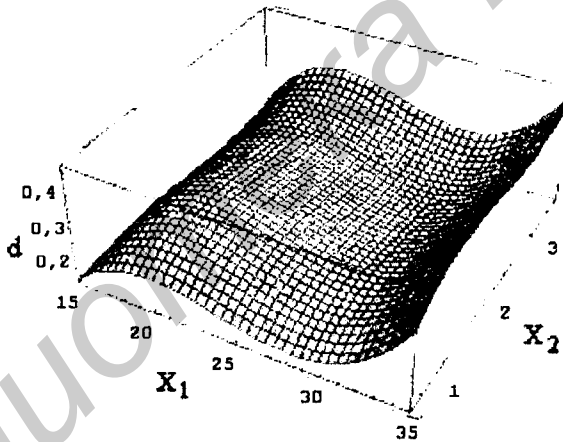


Рис. 3. Зависимости толщины пленки d от факторов X_1 и X_2 при $X_3=0,4\%$

На рис. 3 приведена типичная поверхность отклика для полученной аппроксимационной зависимости $d(X_1, X_2, X_3)$, иллюстрирующая нелинейность зависимостей d от факторов X_2 и X_3 .

Проведены исследования по определению диапазона изменения состава пленкообразующих соединений X_1, X_2, X_3 для получения пленки с толщиной d в интервале 0,18-0,22 мкм.

Данные, представленные на рис. 4, представляют собой точки на поверхности в дискретном координатном пространстве (X_2, X_3) при $X_1=19,3\%$, которые удовлетворяют условиям получения пленки с толщиной в интервале 0,18-0,22 мкм.

Из данных, представленных на рис. 4, можно сделать вывод о диапазоне изменения соответствующих параметров для получения пленки с заданной толщиной.

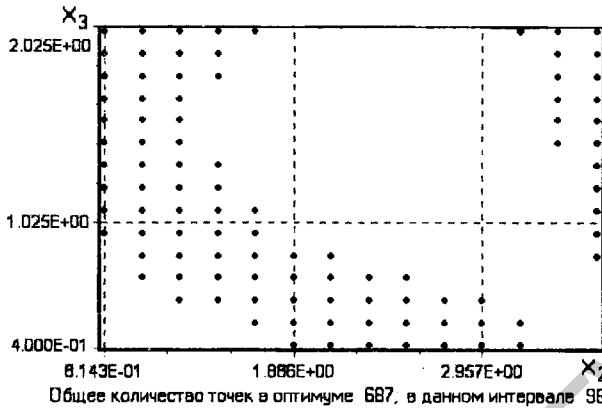


Рис. 4. Диапазон изменения параметров X_2 и X_3 (в %), удовлетворяющие получению пленки толщиной 0,18-0,22 мкм при значении величины $X_1=19,3$ %

Для удовлетворения заданного условия по толщине пленки и при выбранном значении параметра $X_2=0,8$ % диапазоны изменения параметра X_3 должны быть следующие:

$$1,1 \% \leq X_3 \leq 1,8 \% \text{ при } X_1=17,9 \%$$

$$0,9 \% \leq X_3 \leq 2,1 \% \text{ при } X_1=19,3 \%$$

$$0,5\% \leq X_3 \leq 1,2\% \text{ и } 1,9\% \leq X_3 \leq 2,1\% \text{ при } X_1=23,6 \%$$

Проведен статистический анализ некорректных результатов экспериментов по обработке КМОП технологии, проведенных в НИКТП "Белмикросистемы" НПО "Интеграл" (табл. 3).

Таблица 3.

План эксперимента и измеренные пороговые напряжения $V_{T,n}$ для изготовленных пМОП транзисторов.

№ пластины	X_1 ($D_{n,W}$)	X_2 ($D_{n,D}$)	X_3 (D_C)	Измеренное значение порогового напряжения $V_{T,n}$ В для соответствующего прибора на пластине						
				1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1,66	1,718	1,744	1,629	1,629	1,744	1,710
2	0	1	-1	1,206	1,203	1,187	1,174	1,118	1,163	1,105
3	-1	-1	1	1,316	1,465	1,427	1,437	1,414	1,422	1,439
4	-1	0	1	1,489	1,381	1,381	1,465	1,495	1,536	1,452
5	-1	0	-0,0101	1,032	1,041	1,093	1,101	1,067	1,072	1,125
6	1	1	-1	1,089	1,153	1,122	1,087	1,055	1,103	1,093
7	-1	-1	-1	0,822	0,819	0,802	0,877	0,86	0,891	0,875
8	0	0	-1	1,081	0,924	1,032	0,943	0,989	0,955	1,019
9	-1	1	-1	0,714	0,651	0,754	0,551	0,632	0,658	0,565
11	1	-1	-0,0101	1,717	1,701	1,683	1,71	1,693	1,703	1,518
12	0	-1	1	1,649	1,621	1,652	1,558	1,619	1,627	1,589

Продолжение табл. 3

14	-1	-1	-0,0101	1,332	1,297	1,299	1,326	1,313	1,316	1,344
15	-1	1	1	1,451	1,473	1,389	1,471	1,429	1,443	1,461
16	0	-1	-0,0101	1,345	1,347	1,348	1,311	1,21	1,317	1,304
17	1	-1	1	1,825	1,823	1,741	1,831	1,822	1,82	1,847
18	0	-1	-1	1,165	1,16	1,163	1,15	0,969	1,129	1,184
19	0	0	1	1,553	1,597	1,605	1,494	1,556	1,59	1,494
20	0	-1	-1	1,639	1,612	1,74	1,63	1,65	1,311	1,61
21	1	-1	-1	1,478	1,438	1,493	1,409	1,44	1,452	1,484

В этом наборе экспериментов 10-я и 13-я строки сформированы некорректно (отмечены серым цветом): одним и тем же значениями входных параметров соответствуют разные выходные характеристики. Задача состоит в определении одной строки из двух неверных с целью расчета коэффициентов аппроксимирующего полинома с учетом результатов всех экспериментов.

Последовательное применение процедур экспоненциального сглаживания, взвешенного метода наименьших квадратов с последующей проверкой модели на адекватность, основанной на распределении Фишера, приводит к замене некорректных строк на строку, полученную методом движущейся медианы и позволяет рассчитать полином, корректно аппроксимирующий поверхность отклика (максимальная относительная ошибка составляет 0,6889 %). Точность подтверждается итоговой корреляционной зависимостью (рис. 5).

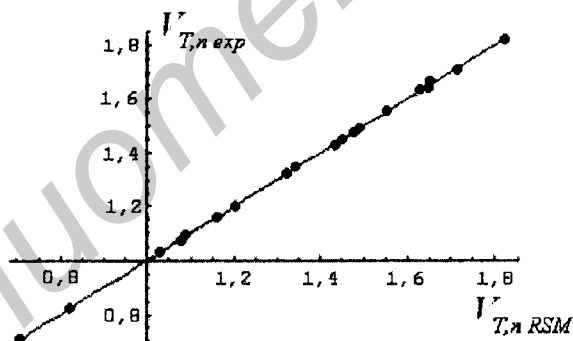


Рис. 5. Итоговая корреляционная зависимость между результатами некорректного эксперимента ($V_{T,n,exp}$) и их аппроксимацией ($V_{T,n,RSM}$) для порогового напряжения

Во всех проведенных исследованиях подтверждена эффективность разработанных методических и программных средств для статистического проектирования и оптимизации технологии ИМС независимо от пространственной и факторной размерности задачи.

В четвертой главе описаны использованные подходы, разработанные алгоритмы и программно-аппаратные средства для осуществления проектирования, статистического анализа технологии ИМС и обучения в сети Интернет/Инtranет.

Предложена концепция взаимодействия удаленных разработчиков, создающих единый проект (например, в области проектирования в микроэлектронике) в сети Интернет, посредством использования современных Интернет-технологий.

Требования к разрабатываемому программному обеспечению заключаются в следующем:

1. Программное обеспечение основывается на технологии клиент-сервер; при этом наиболее ресурсоемкие расчеты осуществляются на серверной части.

2. Математические алгоритмы реализуются с помощью кросс-платформенного объектно-ориентированного языка программирования Java, серверная часть – на языке программирования Си с использованием технологии компании Borland Inc. ISAPI или аналогичной.

3. Санкционированные пользователи должны иметь доступ к программам и их исходным кодам, установленным на главном сервере.

4. Отчет о проведенных расчетах представляется в виде динамически сгенерированного HTML-документа с графиками и протоколом выполнения задания на данном этапе проектирования.

Реализована аппаратно-программная платформа для осуществления проектирования в сети Интернет с использованием современных средств Интернет технологии (сервер Apache, СУБД MySQL, языки программирования PERL/PHP), в частности для решения задач статистической обработки результатов компьютерных и натуральных экспериментов с целью построения их аппроксимационных зависимостей, а также проектирования технологии формирования элементов интегральных микросхем с использованием программы SSuprem 3.

В приложении приведена инструкция пользователю разработанного программного комплекса ICARUS для статистического анализа и оптимизации технологии ИМС, а также акты об использовании и внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс и опытно-промышленное производство.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Использование метода поверхности откликов совместно с разработанными оригинальными алгоритмами и программным обеспечением позволяют проводить многофакторный статистический анализ результатов компьютерных и натуральных экспериментов в цикле Монте-Карло с временными затратами в несколько раз меньшими по сравнению с использованием прямых компьютерных расчетов [3-12, 15-17, 25-26].

2. Использование ортогональных полиномов Чебышева для аппроксимации нелинейных зависимостей в натуральных и компьютерных экспериментах позволяет получить точность аппроксимации, в несколько раз превышающую результаты, получаемые стандартными методами, а использование разработанной методики статистического анализа некорректных экспериментальных данных, содержащих ошибки и погрешности во входных параметрах или выходных характеристиках, основанной на последовательном применении методов сглаживания, позволяет исключить их влияние на результаты статистического анализа всех проведенных экспериментов и оптимизации их параметров [3, 7, 10, 12, 15-16, 25].

3. Разработанные методы, алгоритмы и программное обеспечение для статистического анализа и оптимизации технологии изготовления ИМС позволяют решить общую задачу оптимизации, которая включает определение разброса выходных характеристик прибора/схемы в зависимости от заданного диапазона флуктуаций входных (технологических) параметров (прямая задача) и расчет допустимого разброса технологических параметров, обеспечивающего изменение выходных характеристик технологии/прибора/схемы в заданном диапазоне (обратная задача) [3, 7, 11, 15-17, 19, 25-26].

4. Возможности и надежность предложенных методов, созданных алгоритмов и программного обеспечения для аппроксимации результатов экспериментов, их статистического анализа и оптимизации технологических параметров проверены с использованием результатов серии компьютерных и натуральных экспериментов. Относительная погрешность прогнозируемых результатов не превышает десяти процентов [3-12, 15-17, 25-26].

5. Разработанный программно-аппаратный комплекс, основанный на использовании современных методов программирования и специальных программных средств, позволяет реализовать концепцию виртуального производства ИМС, включая проектирование, статистический анализ и оптимизацию технологии изготовления ИМС в сети Интернет/Интранет, что обеспечивает существенное сокращение финансовых затрат на приобретение специализированных программных комплексов [1-2, 13-14, 21-24].

Разработанные методы, алгоритмы и программное обеспечение внедрены в опытно-промышленное производство в НИКТП "Белмикросистемы", использованы в научных исследованиях (Институт физико-органической химии НАН Б) для статистического анализа и оптимизации технологии изготовления ИМС, используются в лекционных курсах и специализированных лабораторных практикумах учебных заведений Республики Беларусь (БГУИР, БГУ, БНТУ), Российской Федерации (Владимирский технический университет), Украины (Львовская Национальная Политехника) и Республики Польша (Варшавский университет технологий), а также при проведении научных исследований в рамках международного проекта REASON (IST-2000-30193).

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Статьи в научно-технических журналах

1. Стемпицкий В.Р., Чичиро А.С., Нелаев В.В. Аппаратно-программные средства для проектирования в сети Интернет // Известия Белорусской инженерной академии.— 1(13)/2.— 2002.— С. 71-73.
2. Кудин К.А., Прошкина А.А., Стемпицкий В.Р. Проектирование и моделирование в сети Интернет // Известия Белорусской инженерной академии.— 1(15)/2.— 2003.— С. 99-102.
3. Кулешов А.А., Малышев В.С., Нелаев В.В., Стемпицкий В.Р. Статистическое проектирование и оптимизация технологии производства интегральных микросхем // Микроэлектроника.— 2003.— Т. 32, № 31.— С. 47-61.
4. Борисевич В.М., Ковалевский А.А., Нелаев В.В., Малышев В.С., Стемпицкий В.Р. Исследование и оптимизация процесса осаждения пленок поликристаллического кремния, легированного германием как изовалентной примесью // Доклады БГУИР.— 2004.— Т.2, № 3.— С. 139-151.
5. Прошкина А.А., Стемпицкий В.Р. Методы проектирования на технологичность // Известия Белорусской инженерной академии.— 1(17)/2.— 2004.— С. 45-47.

Статьи в научно-технических сборниках

6. Kazitov M.V., Kuzmicz W.B., Nelayev V.V., Stempitsky V.R. Statistical many-dimensional simulation of VLSI technology based on response surface methodology // Proc. SPIE.— 2000.— Vol. 4064.— P. 179-183.
7. Kuzmicz W.B., Malyshev V.S., Nelayev V.V., Stempitsky V.R. Optimization of integrated circuit technology // Proc. SPIE.— 2000.— Vol. 4348.— P. 431-434.
8. Нелаев В.В., Стемпицкий В.Р. RSM метод статистического проектирования и оптимизации технологии ИМС // Республиканский межведомственный сборник научных трудов “Радиотехника и электроника”.— Минск, 2000.— С. 189-195.
9. Kouleshoff A.A., Kuzmicz W.B., Malyshev V.S., Nelayev V.V., Stempitsky V.R. Statistical analysis in MRSМ approach of computing and experimental results for integrated circuit technology // Proc. SPIE.— 2002.— Vol. 4627.— P. 297-305.

Статьи в сборниках трудов конференций

10. Стемпицкий В.Р. Метод поверхности откликов в статистическом проектировании технологии ИМС // “Современные проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств”: Материалы международного научно-технического семинара, Новополоцк, ПГУ, 2000.— С. 99-102.
11. Кулешов А.А., Малышев В.С., Нелаев В.В., Стемпицкий В.Р. Комплекс программного обеспечения для многомерного моделирования и статистического анализа субмикронной технологии изготовления интегральных микросхем // “Вузовская наука, промышленность, международное сотрудничество”: Материалы 3-й международной научно-практической конференции, Минск, БГУ, 2000.— Ч. 2.— С. 174-178.
12. Нелаев В.В., Стемпицкий В.Р. Компьютерная обучающая программа для статистического анализа и оптимизации технологии производства интегральных микросхем // “Проблемы и пути развития высшего технического образования”: Материа-

лы республиканской научно-методической конференции, Минск, БГУИР, 2001.— Ч. 2.— С. 140-142.

13. Нелаев В.В., Стемпицкий В.Р. Апробация методологии статистического проектирования и оптимизации технологии ИМС в условиях опытно-промышленного производства // “Современные средства связи”: Материалы IV международной научно-технической конференции, Нарочь, 1-5 октября 2001 года.— С. 198-201.

14. Нелаев В.В., Стемпицкий В.Р. Изучение технологических процессов микроэлектроники в среде Интернет // “Телематика и непрерывное образование”: Материалы международного семинара, Киев, Украина, 14-17 октября 2001 г. / Межд. науч.-учебный центр информационных технологий и систем АН Украины, Мин-во образования и науки Украины.— С. 135-138.

15. Нелаев В.В., Стемпицкий В.Р. Статистическое проектирование технологии интегральных микросхем в сети Интернет/Инtranет // “Дистанционное обучение – образовательная среда XI века”: Материалы международной научно-методической конференции, Минск, 18-20 декабря 2001 г.— С. 38-39.

16. Неласв В.В., Стемпицкий В.Р. Оптимизация параметров технологии формирования интегральных микросхем // “Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств”: Материалы II-й Международной научно-технической конференции, Новополюцк, 15-17 мая 2002.— Том 1.— С. 36-39.

17. Nelayev V.V., Stempitsky V.R. Statistical analysis and optimization under IC technology design. Training program // “Mixed Design of Integrated Circuits and Systems”: Proc. of the 9th Int. Conf., Wroclaw, Poland, 20-22 June 2002.— P. 685-688.

18. Nelayev V.V., Stempitsky V.R., Tchitchiro A.S. Integrated circuit design at the Internet // “Non-destructive Testing and Computer Simulation”: Proc. Int. Workshop, St. Petersburg, Russia, 2002.— P. F33-F34.

19. Нелаев В.В., Стемпицкий В.Р. Проблемы и пути повышения производительности проектирования изделий микроэлектроники // “Новые технологии изготовления многокристалльных модулей”: Материалы докладов международной научно-технической конференции, Минск, БГУИР, 30 сентября-4 октября 2002 г.— С. 177-180.

20. Колосницын Б.С., Стемпицкий В.Р. Структурные преобразования в многослойных тонкопленочных элементах на основе теллура // “Новые технологии изготовления многокристалльных модулей”: Материалы докладов международной научно-технической конференции, Минск, БГУИР, 30 сентября-4 октября 2002 г.— С. 139-141.

21. Нелаев В.В., Стемпицкий В.Р. Обучение и проектирование технологии интегральных микросхем в сети Интернет // “Дистанционное обучение – образовательная среда XI века”: Материалы II между. научно-методической конференции, Минск, 26-28 ноября 2002 г.— С. 41-43.

22. Nelayev V.V., Stempitsky V.R. Statistical analysis and optimization of IC technology: Program package for training and design via Internet/Intranet // “CAD Systems in Microelectronics”: Proc. of Int. Conf., Lviv-Slavsko, Ukraine, February 18-22, 2003.— P. 337-338.

23. Nelayev V.V., Stempitsky V.R., Kudin K.A. Design and simulation via Internet // “Mixed Design of Integrated Circuits and Systems”: Proc. of the 10th Int. Conf., Lodz, Poland, 26-28 June 2003.— P. 665-668.

24. Нелаев В.В., Кудин К.А., Стемпицкий В.Р. Опыт использования средств разработки мультимедийных и обучающих приложений для дистанционного обуче-

ния // “Дистанционное обучение – образовательная среда XI века”: Материалы III межд. научно-методической конференции, Минск, 13-15 ноября 2003 г.— С. 354-357.

25. Nelayev V., Stempitsky V. Mathematical methods for statistical simulation and statistical analysis of semiconductor manufacturing // “Informatics, Mathematical Modeling and Design”: Proc. of Int. Scientific Conf., Vladimir, 2004.— P. 20-25.

26. Nelayev V.V., Stempitsky V.R., Kovalevsky A.A. Program package for statistical analysis and optimization of technology // “Mixed Design of Integrated Circuits and Systems”: Proc. of the 11th Int. Conf., Szczecin, Poland, 26-28 June 2004.— P. 238-241.

Тезисы докладов

27. Стемпицкий В.Р. Система схемотехнического моделирования и проектирования печатных плат Design Center (PSpice) // “Научно-методические проблемы совершенствования подготовки специалистов”: Тез. докл. научно-методической конф., Беларусь, Минск, БГУИР, 1998.— С. 29-30.



Библиотека БГУИР

РЭЗЬЮМЭ

Стэмпіцкі Віктар Раманавіч СТАТЫСТЫЧНЫ АНАЛІЗ І АПТЫМІЗАЦЫЯ ТЭХНАЛОГІІ ВЫРАБУ ІНТЭГРАЛЬНЫХ МІКРАСХЕМ МЕТАДАМ ПАВЕРХНІ ВОДГУКА

Ключавыя словы: статыстычны аналіз, тэхналагічныя параметры ІМС, планаванне эксперыменту, апраксімацыя, аптымізацыя, праектаванне на тэхналагічнасць.

Мэтай работы з'яўляецца распрацоўка метадаў, алгарытмаў і праграмага забеспячэння для статыстычнага аналізу і аптымізацыі тэхналогіі ІМС, у тым ліку для праектавання ў сетцы Інтэрнэт.

Аб'ект і прадмет даследавання. Згодна з пастаўленай задачай аб'ектам даследавання выбраны тэхналагічныя працэсы вырабу структурных элементаў прыбораў мікраэлектронікі. Прадметам даследавання выбраны сувязі паміж уваходнымі параметрамі і выхаднымі характарыстыкамі тэхналагічных працэсаў фарміравання ІМС.

Выкарыстанне метада паверхні водгукаў разам з распрацаванымі арыгінальнымі алгарытмамі і праграмным забеспячэннем дазваляюць праводзіць у цыкле Монтэ-Карла шматфактарны статыстычны аналіз вынікаў камп'ютэрных і натуральных эксперыментаў са значна большай эфектыўнасцю ў параўнанні з выкарыстаннем прамых камп'ютэрных разлікаў.

Прапанаваныя метады планавання эксперыменту дазваляюць значна знізіць часавыя і матэрыяльныя затраты на правядзенне даследаванняў.

Выкарыстанне артаганальных паліномаў Чэбышава забяспечваюць больш высокую дакладнасць апраксімацыі вынікаў камп'ютэрных і натуральных эксперыментаў.

Распрацаваная методыка статыстычнага аналізу некарэктных эксперыментальных дадзеных, якія змяшчаюць памылкі і хібнасці ва ўваходных ці выхадных характарыстыках, дазваляе выключыць іх уплыў на вынікі статыстычнага аналізу ўсіх праведзеных эксперыментаў і аптымізацыі іх параметраў.

Распрацаваныя падыходы, алгарытмы і праграмага забеспячэнне дазваляюць вырашыць агульную задачу аптымізацыі, якая ўключае вызначэнне роскідку выхадных характарыстык прыбора/схемы ў залежнасці ад зададзенага дыяпазону флуктуацый уваходных (тэхналагічных) параметраў (прамая задача) і разлік дапушчальнага роскідку тэхналагічных параметраў, які забяспечвае змяненне выхадных характарыстык тэхналогіі/прыбора/схемы ў зададзеным дыяпазоне (адваротная задача).

Магчымасці і надзейнасць прапанаваных метадаў, створаных алгарытмаў і праграмага забеспячэння для апраксімацыі вынікаў эксперыментаў, іх статыстычнага аналізу і аптымізацыі тэхналагічных параметраў правяраны з выкарыстаннем вынікаў серыі камп'ютэрных і натуральных эксперыментаў.

Паказана эфектыўнасць прапанаваных метадаў і працаздольнасць распрацаванага праграма-апаратнага комплексу для праектавання і навучання ў сетцы Інтэрнэт/Інтранэт.

РЕЗЮМЕ

Стемплицкий Виктор Романович СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ МЕТОДОМ ПОВЕРХНОСТИ ОТКЛИКА

Ключевые слова: Статистический анализ, технологические параметры ИМС, планирование эксперимента, аппроксимация, оптимизация, проектирование на технологичность.

Целью работы является разработка методов, алгоритмов и программного обеспечения для статистического анализа и оптимизации технологии ИМС, в том числе для проектирования в сети Интернет.

Объект и предмет исследования. В соответствии с поставленной задачей объектом исследования выбраны технологические процессы формирования структурных элементов приборов микроэлектроники. Предметом исследования выбраны связи между входными параметрами и выходными характеристиками технологических процессов формирования ИМС.

Использование метода поверхности откликов совместно с разработанными оригинальными алгоритмами и программным обеспечением позволяют проводить в цикле Монте-Карло многофакторный статистический анализ результатов компьютерных и натуральных экспериментов с гораздо большей эффективностью по сравнению с использованием прямых компьютерных расчетов.

Предложенные методы планирования эксперимента позволяют значительно снизить временные и материальные затраты на проведение исследований.

Использование ортогональных полиномов Чебышева обеспечивает более высокую точность аппроксимации результатов компьютерных и натуральных экспериментов.

Разработанная методика статистического анализа некорректных экспериментальных данных, содержащих ошибки и погрешности во входных параметрах или выходных характеристиках, позволяет исключить их влияние на результаты статистического анализа всех проведенных экспериментов и оптимизации их параметров.

Разработанные подходы, алгоритмы и программное обеспечение позволяют решить общую задачу оптимизации, которая включает определение разброса выходных характеристик прибора/схемы в зависимости от заданного диапазона флуктуаций входных (технологических) параметров (прямая задача) и расчет допустимого разброса технологических параметров, обеспечивающего изменение выходных характеристик технологии/прибора/схемы в заданном диапазоне (обратная задача).

Возможности и надежность предложенных методов, созданных алгоритмов и программного обеспечения для аппроксимации результатов экспериментов, их статистического анализа и оптимизации технологических параметров проверены с использованием результатов серии компьютерных и натуральных экспериментов.

Показана эффективность предложенных методов и работоспособность разработанного программно-аппаратного комплекса для проектирования и обучения в сети Интернет/Интранет.

SUMMARY

Stempitsky Viktor Romanovich STATISTICAL ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY USING RESPONSE SURFACE METHODOLOGY

Keywords: Statistical analysis, IC technology parameters, design of experiment, approximation, optimization, technology design.

The aim of the work is the development of methods, algorithms and software for statistical analysis and optimization of integrated circuit (IC) technology including design via Internet.

Object and subject of the researches. In accordance with the settled task, technological processes for the manufacturing of structure elements of microelectronic devices were selected. The selected subject of the study are the relationships between input parameter and output features of the IC technology.

Use of the response surface method jointly with the developed original algorithms and software allow to perform in the Monte-Carlo loop many-factorial statistical analysis of the computer and natural experiments with much greater efficiency in contrast with use of the direct computer simulations.

The offered methods of the design of experiment allow to reduce vastly the time and material expenses for the performance of investigations.

Use the orthogonal Chebyshev's polynomials provides more high accuracy of approximations of the results of computer and natural experiments.

Developed methods for statistical analysis of incorrect experiment data, containing mistakes and inaccuracy of input parameter or output features allows to exclude their influence upon statistical analysis results of all experiments and upon optimization of their parameters.

Developed approaches, algorithms and software allow to solve the general optimization problem including the determination of the scatter of output device/circuit features depending on the specified range of the input (technological) parameter fluctuations (the straight problem) and calculation of the possible diapason of the technology parameters, providing the change of output features of technology/device/circuit in the specified range (the inverse problem).

Possibilities and reliability of the developed methods, algorithms and software for approximation of the experimental results, their statistical analysis and optimization of the technology parameters were proved by use of the multiple results of computer and natural experiments.

The efficiency of the developed methods and capacity to work of the developed complex for design and learning in the Internet/Intranet network was achieved.

СТЕМПИЦКИЙ ВИКТОР РОМАНОВИЧ

**СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ
ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ
МИКРОСХЕМ МЕТОДОМ ПОВЕРХНОСТИ ОТКЛИКОВ**

Специальность 05.27.01 – “Твердотельная электроника,
радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника,
приборы на квантовых эффектах”

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать	11.10.2004.	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Печать ризографическая.		Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,3.	Тираж 80 экз.		Заказ 608.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Лицензия на осуществление издательской деятельности №02330/0056964 от 01.04.2004.
Лицензия на осуществление полиграфической деятельности №02330/0133108 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровка, 6.