

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования

Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.382.6.002

Кузьменков  
Александр Валерьевич

ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ,  
ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание академической  
степени магистра технических наук

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

Научный руководитель:  
канд. техн. наук,  
доцент кафедры МНЭ  
Стемпицкий В.Р.

Минск, 2015

## ВВЕДЕНИЕ

Компьютерное моделирование является одной из немногих доступных методик, которые позволяют сократить временные и материальные затраты в процессе разработки новых изделий электроники. Всестороннее компьютерное проектирование и моделирование охватывает следующие тематические области:

- Моделирование в процессе масштабирования приборов и характеристик – иерархия моделей, которые позволяют моделировать локальное воздействие технологического оборудования (за исключением литографического) в каждой точке пластины, особенно при осаждении, травлении и процессах химико-механической полировки, с использованием параметров технологического оборудования;
- Моделирование литографии – моделирование переноса рисунка маски с помощью информации о литографическом оборудовании, характеристиках фоторезиста и параметрах обработки пластины;
- Моделирование технологического маршрута – моделирование физических эффектов на различных этапах производства, используемых для создания транзисторов вплоть до металлизации (за исключением литографии);
- Приборное моделирование – иерархия физически обоснованных моделей для описания функционирования активных приборов;
- Моделирование межсоединений и интегрированных пассивных элементов – изучение различных особенностей (механических, электромагнитных и тепловых свойств) законченной архитектуры;
- Компактное моделирование – компактные модели для активных, пассивных и паразитных элементов микросхем, а также новых элементов, базирующихся на новых приборных структурах;
- Моделирование корпусов микросхем – электрическое, механическое и тепловое моделирование корпусов микросхем;
- Моделирование материалов – применение таких инструментов моделирования, которые предсказывают физические свойства материалов и, в некоторых случаях, обусловленные ими электрические свойства;
- Моделирование надежности – моделирование надежности и связанных с этим эффектов на уровне технологии, прибора и интегральной микросхемы;
- Моделирование адекватности проектирования, производства и доходности – разработка дополнительных моделей и программного обеспечения для того, чтобы

использовать TCAD при изучении влияния неизбежного разброса технологических параметров и флуктуаций легирующих примесей на характеристики ИМС и, в свою очередь, на параметры проектирования, технологичность и процент выхода годных ИМС;

- Численные методы и совместимость инструментария – все алгоритмы, необходимые для реализации моделей, разработанных в любом из разделов, параллельных вычислений для систем дифференциальных уравнений, процедур оптимизации, а также взаимодействия/интеграции между различными программами моделирования.

Наиболее важная общая тенденция, необходимая в области моделирования, состоит в интеграции, не только между различными процессами, технологией, прибором, интегральной микросхемой, топологией и проектом, а также между различными уровнями описания. В некоторых случаях программные средства моделирования связаны друг с другом (например, программные средства технологического и приборного моделирования, различные инструменты проектирования), в то время как во многих других областях программные средства по-прежнему не способны взаимодействовать.

Таким образом, целью магистерской диссертации является исследование и апробация современных комплексов компьютерного проектирования технологии/прибора/схемы/системы, реализующих возможности статистического анализа, оптимизации, хранения и обработки результатов компьютерных/натурных экспериментов.

## **1 ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ И ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Поставщики TCAD играют важную роль в расширении возможностей моделирования и проектирования. Усилия в области моделирования в рамках полупроводниковой промышленности в основном сосредоточены вокруг адаптации и применения возможностей моделирования для разработки и оптимизации технологий, приборов и микросхем.

Появление новых возможностей в области моделирования обычно требует долгосрочных, в том числе все большего количества междисциплинарных, исследований, которые могут быть выполнены наилучшим образом в лабораторных условиях. По этой причине, энергичная научно-исследовательская работа в университетах и независимых исследовательских институтах, тесное сотрудничество с промышленностью является необходимым условием для достижения успеха в области моделирования. Поскольку необходимая базовая работа в общем случае требует значительных временных затрат, крайне важно, чтобы своевременно были созданы адекватные исследовательские фонды для решения будущих важных потребностей отрасли.

Наиболее сложные задачи моделирования, с одной стороны, должны быть выполнены в срок, чтобы поддержать прогресс на высоком уровне в соответствии с дорожной картой, а с другой стороны, являются первостепенными для выполнения из-за их технической сложности. Кроме того, следует отметить, что ключевой задачей является экспериментальная проверка результатов моделирования. Эта задача особенно трудна, потому что для большинства процессов многие физические эффекты взаимодействуют друг с другом, а значит, должны быть соответствующим образом разделены с помощью правильно выбранных экспериментов для того, чтобы иметь возможность разработки моделей, обладающих достаточной предсказательной способностью. По мере уменьшения размеров устройств и введения новых материалов в технологический процесс, большое значение приобретают новые и усовершенствованные аналитические методы, которые позволяют извлечь необходимую информацию для развития этой модели и проверить соответствие с экспериментальными данными.

Моделирование включает в себя множество приложений с широко меняющимися требованиями к нему. Например, для приложений, тесно связанных с проектированием, скорость и точность феноменологических моделей являются основными требованиями, в то время как предсказательная способность вторична. Примерами являются компактное моделирование и модели литографии, встроенные в OPC-системы. В приложениях,

связанных с разработкой технологии, требования могут быть интерпретированы как необходимость смешивания физически обоснованных моделей и калиброванных/параметризованных эмпирических моделей. Традиционные TCAD-приложения, когда они используются для оптимизации разработки технологии (с использованием высоко калиброванных моделей), соответствуют этому описанию. Наконец, есть области моделирования, в которых в настоящее время изучаются физические основы различных процессов. Примерами являются программы приборного моделирования методом Монте-Карло или расчеты из первых принципов.

Следует отметить, однако, что есть общая тенденция предъявлять более жесткие требования к физической обоснованности моделей, которые должны обладать большей предсказательной силой и в меньшей степени нуждаться в калибровке. Кроме того, интеграция различных стадий технологии (которые влияют друг на друга), а также процессов масштабирования прибора и характеристик, становится все более важной, и делает более трудным определение параметров отдельных элементов, не принимая во внимание других.

При исследовании времени цикла для разработки новой технологии установлено, что большая часть этого времени, а также стоимости разработки приходится не на индивидуальное развитие модуля, а затрачивается на уровне интеграции. Существует острая необходимость для программных средств моделирования в обеспечении более тесной взаимной связи для эффективного учета непредвиденных воздействий на предыдущем этапе при переходе на следующий. Решение этой задачи требуется для следующих целей:

- Взаимодействия или интеграции отдельных инструментов моделирования при масштабировании приборов и характеристик. Примером является интегрирование инструмента моделирования литографии, который предсказывает характеристики воздействия на фоторезист, с инструментом моделирования плазменного травления, который предсказывает профили травления в зависимости от длительности процесса и чувствительности материала.
- Обеспечения взаимодействия инструментов моделирования структуры материалов с программным обеспечением, которое предсказывает электронные свойства. Например, это было бы полезно при разработке диэлектрических пленок с высокой диэлектрической проницаемостью. Будущие программные средства в этой области смогут рассматривать затвор в качестве структуры, а не в виде отдельных компонентов. Также может быть изучена сущность взаимодействия материалов и эффекты, влияющие на надежность.

- Интеграции инструментов проектирования ИМС с инструментами моделирования тепловых, механических и электрических свойств корпуса для создания среды совместного проектирования.
- Создания структурированных наборов данных, которые содержат необходимые физические величины и облегчают передачу параметров между инструментами моделирования и проектирования.
- Интеграции программ приборного моделирования с робастными методами для создания компактных моделей и файлов, описывающих приборы при проектировании.
- Разработки иерархии тесно связанных инструментальных средств моделирования – от таблиц до первопринципных инструментов. Это позволит промышленности выбрать наиболее подходящий уровень описания при решении задач моделирования вместе с соответствующей и эффективной передачей данных, когда задача требует исследования на различных уровнях (например, для изучения влияния изменения технологии на весь проект).

Анализ современного рынка микроэлектроники и прогнозов его развития на ближайшие годы показывает, что:

- резко возрастает стоимость новых предприятий,
- увеличивается стоимость разработок новых микросхем и их сложность,
- возрастает потребность в сокращении сроков проектирования новых изделий,
- “время жизни” новых разработок значительно сокращается,
- требуется существенное уменьшение сроков освоения новой продукции.

Повышение сложности современных изделий микроэлектроники и систем на кристалле, увеличение плотности интеграции элементов интегральных схем (ИМС) на кристалле выдвигают на первый план вопрос об экономической эффективности и технологичности производства, которые характеризуются как начальным (на стадии освоения ИМС) выходом годных изделий, так и скоростью его повышения, а также временем достижения экономически обоснованного выхода годных. При этом действительно эффективной может быть только гибкая система с автоматическим управлением технологическим процессом, выбором режимов, документированием маршрута, т.е. реализующая концепцию компьютерно-интегрированного производства [1]. Реализуемые проекты должны быть не просто проверены, они должны быть адаптированы к заданной производственной среде, оптимизированы с точки зрения выхода годных. Решение такого рода задач обычно объединяется в рамках так

называемого “проектирования на технологичность” и может осуществляться только с использованием компьютерного моделирования.

Под технологичностью конкретного изделия подразумевается обычно величина, характеризующая эффективность его производства, при этом высокий уровень технологичности может рассматриваться как одно из основных целей проектирования. Уровень технологичности оценивается по результатам проектирования.

Технологичным считается проект, который:

- обеспечивает высокий начальный выход годных изделий;
- обладает наилучшими характеристиками при определенных рабочих условиях и одновременно стабилизирован за счет минимизации чувствительности параметров ИМС к нарушениям технологии.

Идея проектирования для повышения технологичности (design for manufacturability) состоит в достижении более высоких параметров изделий, уменьшении числа переделок и сокращении времени до появления первых образцов на рынке. Можно выделить две основные составляющие проектирования для повышения технологичности:

- по изделию (проектирование схемы и топологии, которые технологичны при заданных допусках на отработанный технологический процесс)
- по процессу (разработка технологического процесса на основе дискретной последовательности технологических операций при обеспечении минимальной чувствительности выходных параметров к случайным нарушениям технологии).

Проектирование с учетом технологичности опирается на:

- автоматизированные средства проектирования и разработки,
- реляционные базы данных и вычислительные сети,
- статистическое управление технологией,
- современные средства моделирования.

При внедрении проектирования с учетом технологичности в современном производстве СБИС появляются следующие преимущества:

- повышение выхода годных в процессе производства и улучшение характеристик изделий,
- высокая прогнозируемость выхода годных изделий,
- определение компромисса между получением качественных характеристик и повышением выхода годных изделий разработчиками изделия
- сокращение времени цикла проектирования и производственного цикла,
- повышение качества изделия.

Очень часто проектирование на технологичность означает проектирование на максимально высокий выход годных. На современном рынке микроэлектроники выход годных является фактором успеха, определяющим такую важную характеристику производства как прибыль.

Для повышения выхода годных следует разрабатывать все более совершенные программы и аппаратные средства для моделирования и управления производством, которые смогли бы прогнозировать результаты технологических процессов и отдельных операций, поведение приборов и схем, значения выхода годных сложного процесса изготовления ИМС, обеспечивать возможность адаптивного управления технологическим процессом в реальном времени и т. д.

В этой связи актуальна концепция “виртуального производства”, которая включает моделирование технологических процессов производства ИМС и прогнозирование характеристик микросхем. “Виртуальное производство” (ВП) – это общее понятие для интегрированной системы программных и аппаратных средств и методов моделирования, которая позволяет разработчикам синтезировать полный маршрут технологического процесса и изготавливать ИМС, полностью оптимизированные по критериям надежности, технологичности, характеристик, стоимости, жизненного цикла и времени производственного цикла.

Предполагается, что в среде “виртуального производства” проводится моделирование и прогнозирование различных аспектов реального производства, в том числе:

- быстрый анализ временных характеристик производства;
- прогнозирование результатов изменений процесса до реализации изделия;
- уменьшение времени и стоимости разработки и реализации новых процессов, приборов и самой фабрики;
- осуществление точного и эффективного моделирования с целью диагностики и управления производством.

Система Virtual Wafer Fabric (VWF) – “Виртуальная фабрика пластин”, разработанная фирмой SILVACO, объединяет средства автоматизированного проектирования электронных изделий, технологического проектирования и усовершенствованные имитационные модели оборудования.

Реальное производство осуществляется согласно базовому технологическому маршруту на промышленном оборудовании, тогда как в «виртуальном производстве» роль оборудования выполняют средства машинного моделирования. Каждый эксперимент в рамках ВП значительно дешевле по сравнению с традиционной обработкой пластин.



Кроме того, результаты моделирования можно получить в более короткие сроки, чем при «натуральном» эксперименте. И при этом предоставлены широкие возможности по детальному исследованию технологического процесса и дальнейшей оптимизации по выходу годных, стоимости, характеристикам изготавливаемых ИМС. Таким образом, «виртуальное производство» объединяет возможности высокоточного приборно-технологического моделирования и объемного статического исследования, рисунок 1.1.

С помощью комбинации планирования эксперимента, метода поверхности отклика, статистической оптимизации и приборно-технологического моделирования можно провести анализ чувствительности выходных параметров при случайных нарушениях технологии и получить оптимальный ряд технологических параметров, которые позволяют достигнуть требуемого значения выходных характеристик прибора или схемы и обеспечить стабильность технологии. Подобное применение ВП дает возможность существенно сократить сроки проектирования и внедрения новых технологических процессов в производство и обеспечить эффективный прогноз изменений параметров ИМС при изменении параметров технологии.

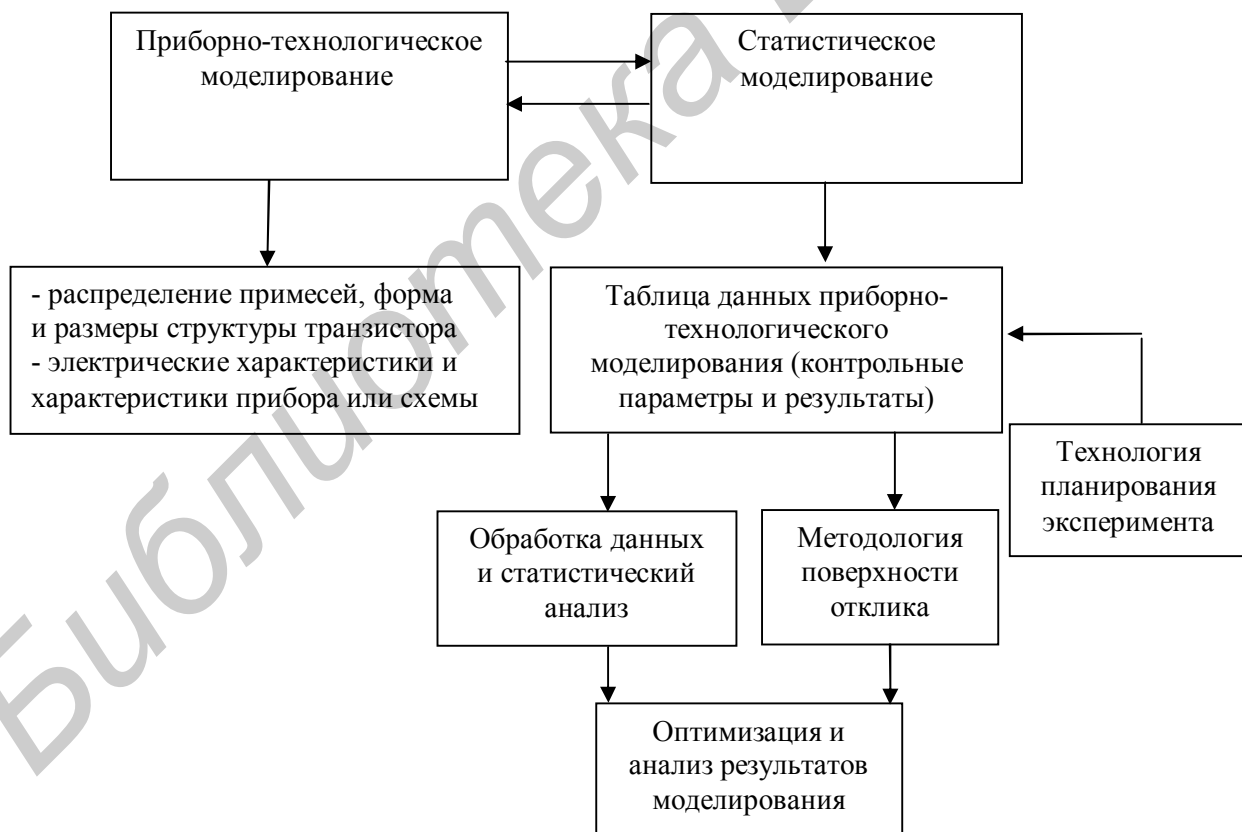


Рисунок 1.1 – Структура и возможности «виртуального производства» для проектирования новых технологий СБИС

Важным моментом является не только применение программных средств и методов моделирования и анализа полного технологического маршрута изготовления ИМС, но и

возможности детального и глубокого исследования отдельных «проблемных» задач с помощью моделирования.

Прогноз изменений параметров ИМС при изменении параметров оборудования и топологии связан с задачей оптимизации правил проектирования, обеспечивающий ненулевой выход годных. В основе решения обеих проблем лежит исследование масштабирования отдельных элементов, выявление областей стабильности их электрических характеристик. При этом особенно важно учитывать интегральный характер структур и влияние, которое оказывает на физику работы прибора взаимодействие активных и изолирующих областей. Для проведения таких комплексных исследований незаменимым инструментом является «виртуальное производство», позволяющее выполнить глубокий и всесторонний анализ с учетом всех значимых факторов [2].

Для достижения высокой технологичности (когда технологический процесс и разработанный проект обеспечивают ненулевой выход годных с первой пластины и высокую скорость роста выхода на этапе производства) необходимо выполнение, в том числе неоднократное, ряда последовательных этапов. Каждый из этих этапов имеет свои промежуточные цели, входные и выходные данные, алгоритмы поиска решений. На рисунке 1.2 показано, что область эффективного использования виртуального производства охватывает большинство этапов, включая наиболее трудоемкие, с наибольшим числом возможных циклических повторений.

«Виртуальное производство» позволяет разработчикам синтезировать полный маршрут технологического процесса и изготавливать ИМС, полностью оптимизированные по критериям надежности, технологичности, характеристик, стоимости, жизненного цикла и времени производственного цикла. И в этой связи актуальна, как и было сказано в этой главе, разработка и реализация данных систем, которые находятся на начальной стадии освоения. Именно поэтому, очень важным достижением является система - «Виртуальная фабрика пластин» (VWF), разработанная фирмой Silvaso. Виртуальная фабрика используется как оболочка, поддерживающая все программные средства, необходимые для производства реальной продукции, объединяет средства автоматизированного проектирования электронных изделий, технологического проектирования и усовершенствованные имитационные модели оборудования.



Рисунок 1.2 – Использование «виртуального производства» для повышения технологичности СБИС

В диссертации показана возможность использования инструментальных средств VWF ACP Tools для создания данных связанных с проектированием МОП транзисторов. И n- и p-канальные МОП-транзисторы проектируются, начиная с моделирования технологии (Process Simulation) и заканчивая моделированием прибора (Device Simulation).

Сначала параметры прибора экстрагируются из промоделированных ВАХ и из моделируемой структуры. Геометрические параметры включают глубины залегания pn-перехода, концентрации на поверхности и толщины окисла.

Создается также матрица отклонений технологических параметров, представляющая собой множество разбиений. Конечные результаты моделирования представлены в форме рабочей таблицы, ряда графиков рассеяния и в форме регрессионной модели.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В магистерской диссертации рассматривается реализация концепции «Виртуального производства» и, в частности, реализация этой концепции в программном комплексе Silvaso.

Рассмотрены проблемы реального производства, где выдвигается вопрос об экономической эффективности и технологичности этого производства, тогда как в «виртуальном производстве» роль оборудования выполняют средства машинного моделирования. Обсуждается вопрос о «Виртуальном производстве», которое позволяет разработчикам синтезировать полный маршрут технологического процесса и изготавливать ИМС, полностью оптимизированные по критериям надежности, технологичности, характеристик, стоимости, жизненного цикла и времени производственного цикла. Именно поэтому, очень важным достижением является «Виртуальная фабрика пластин» (VWF), разработанная фирмой Silvaso и используемая как оболочка, поддерживающая все программные средства, необходимые для производства реальной продукции, объединяет средства автоматизированного проектирования электронных изделий, технологического проектирования и усовершенствованные имитационные модели оборудования.

Описаны преимущества использования VWF Silvaso (виртуальной фабрики Silvaso), что позволяет выполнять все действия в одном программном обеспечении. Описана структура виртуальной фабрики (VWF), компоненты и конфигурация программного обеспечения. Кратко изложены возможности применения таких инструментальных средств VWF, как DeckBuild, TonyPlot, DevEdit и MaskViews, Optimizer. Таким образом, инструментальная среда VWF обеспечивают полностью интегрированную среду для проведения основанного на моделировании проектирования, оптимизации и выполнения экспериментов с топологическими проектными нормами, технологическими маршрутами и испытаниями прибора, используя программы моделирования технологии и прибора.

В экспериментальной части диссертации инструментальная среда VWF использована для оптимизации толщины подзатворного диэлектрика, показана возможность проведения эксперимента. Конечные результаты моделирования представлены в форме рабочей таблицы, ряда графиков рассеяния и в форме регрессионной модели.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

- 1 – А. Доклад на 49-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР // Экспертная система для проектирования интегральных микросхем / май 2013 г / Минск
- 2 – А. Доклад на 50-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР // “Виртуальная фабрика производства”, как разновидность экспертной системы для проектирования интегральных микросхем / 24 -28 марта 2014 г / Минск

Библиотека БГУИР