На правах рукописи

УДК 621.382

Глушко Андрей Александрович

# МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КНИ КМОП СБИС С СУБМИКРОННЫМИ ПРОЕКТНЫМИ НОРМАМИ

05.13.12 – Системы автоматизации проектирования (в промышленности)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва – 2011

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор Шахнов Вадим Анатольевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Назаров Александр Викторович (МАИ)
кандидат технических наук Репин Владимир Валериевич (ФГУП «НИИМА «Прогресс»)

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «НПП «Пульсар» (Москва)

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
1988119
Глушко А.А. Методы моделиро

Защита диссертации состоится «1» марта 2012 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д212.141.10 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

Ваш отзыв в 1 экземпляре просим высылать по указанному адресу.

Автореферат разослан «_____» января 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
к.т.н., доцент Иванов С.Р.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** К современной электронной аппаратуре как общего, так и специального назначения, предъявляются все более жесткие требования по повышению быстродействия и надежности при снижении габаритных размеров и энергопотребления. Удовлетворению этих требований в большой мере способствует совершенствование элементной базы сверхбольших интегральных схем (СБИС). Уменьшение размеров элементов СБИС и применение технологии кремний-на-изоляторе (КНИ) позволяет многократно повысить быстродействие, снизить энергопотребление, повысить радиационную стойкость и т.д. Однако, продвижение в область субмикронных размеров сопровождается существенным ростом сложности проектирования и изготовления СБИС: технологический процесс насчитывает несколько сотен операций; используется уникальное технологическое и измерительное оборудование, материалы и оснастка; предъявляются сверхжесткие требования к чистоте и климату производственных помещений; становится обязательным учет малоразмерных физических эффектов при проектировании схем, аналитический расчет которых на основе инженерных формул в принципе невозможен. Применение субмикронных технологий требует обязательного учета трехмерных эффектов при проектировании конструкций элементов СБИС, что также существенно усложняет их разработку.

Важнейшим методом исследования при этом становится приборно-технологическое моделирование, которое, в конечном счете, позволяет снизить стоимость разработки за счет уменьшения материальных затрат на проведение экспериментальных исследований, а также повысить процент выхода годных СБИС в серийном производстве. Этот метод основан на решении фундаментальных уравнений физики, описывающих процессы, протекающие в металлах, окислах и полупроводниках, и реализован в виде многомодульной технологической САПР (TCAD), которая позволяет исследовать поведение элементов СБИС и технологические процессы их изготовления. Наиболее совершенной на сегодняшний день является система TCAD Sentaurus фирмы Synopsys (США), лидера в области разработки технологических САПР. Однако существующие САПР в своем базовом варианте не могут быть использованы для моделирования процессов формирования структур и их электрических характеристик, поскольку двумерное моделирование, вообще говоря, не позволяет достичь требуемой точности применительно к транзисторам с произвольной конфигурацией затвора, а при трехмерном моделировании возникает неприемлемо низкая точность расчетов. Кроме того, длительность расчета одной характеристики может достигать нескольких недель. Актуальна и реализация связи между литографическими САПР и САПР приборно-технологического моделирования для учета влияния литографических эффектов на электрические характеристики создаваемых структур.

**Состояние проблемы.** Существующие методики, методы и модели физических процессов, заложенные в системе TCAD Sentaurus, не позволяют реализовать трехмерное моделирование сложных структур из-за

неустойчивости сходимости процесса моделирования и требования существенных системных ресурсов (даже на мощных вычислительных серверах с объемом оперативной памяти 16 Гбайт) и временных затрат.

Модели физических процессов, заложенные в системе TCAD Sentaurus, являются результатом работ многих зарубежных исследователей. Наиболее известны работы Антониадиса Д., Даттона Р., Оулдхема У., Ферри Д., Эйкерса Л., Гринича Э.

В России с решением подобных задач связаны работы Киреева В.Ю., Королева М.А., Зебрева Г.И. Непосредственно с моделированием в системах TCAD связаны работы коллективов, возглавляемых Крупкиной Т.Ю., Петросянцем К.О., а также работы Виноградова Р.Н., Дроздова В.Г., Корнеева С.В., Седова А.В. и Максимова А.Н.

**Цель работы** заключается в разработке модифицированных методов приборно-технологического моделирования, позволяющих повысить точность моделирования и сократить временные затраты на проектирование субмикронных элементов КНИ КМОП СБИС.

**Решаемые задачи.** Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие задачи:

1. Обеспечить сопряжение САПР литографического и приборно-технологического моделирования TCAD с целью учета эффекта искажения топологии в процессе литографии;
2. Выполнить трехмерное моделирование диффузионного профиля КНИ МОП-структур с субмикронными нормами;
3. Уменьшить время моделирования трехмерных КНИ МОП-структур с субмикронными нормами;
4. Повысить точность моделирования на основе перехода к трехмерному моделированию, а также калибровки и корректировки существующих моделей в САПР приборно-технологического моделирования.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач применены методы математического моделирования, аналитические методы расчета параметров моделей, метод ветвей и границ и метод линейной аппроксимации.

**Научная новизна работы состоит в следующем:**

1. Разработана методика трехмерного моделирования с учетом литографических эффектов, отличающаяся применением криволинейной сетки, получаемой на основе формирования тонких полосок кремния вдоль границы топологической области затвора формируемого КНИ МОП-транзистора.
2. Разработаны рекомендации по улучшению сходимости и повышению точности процесса трехмерного приборно-технологического моделирования электрических характеристик КНИ МОП-транзисторов за счет учета снижения подвижности носителей на границе окисел-кремний, выполняемого на основе предварительного двумерного моделирования.
3. Предложен метод определения эквивалентной ширины канала для калибровки моделей подвижности носителей в канале КНИ МОП-транзисторов, заключающийся в построении линейной аппроксимации расчетных и

экспериментальных зависимостей тока насыщения транзистора от геометрической ширины канала.

**Достоверность полученных научных результатов, выводов и рекомендаций диссертационной работы** подтверждена результатами экспериментальных исследований, проведенных в НИИСИ РАН. Расхождение между электрическими характеристиками, полученными на основании трехмерного моделирования, и экспериментальными составило не более 10%.

**На защиту выносятся:**

1. Методика трехмерного моделирования процесса формирования субмикронных элементов КНИ КМОП СБИС в системе TCAD, отличающаяся от стандартной сокращением числа вершин в топологии затвора после литографического моделирования и построением криволинейной сетки конечных элементов, обеспечивающей снижение количества узлов в ряде случаев на 50%, что позволяет реализовать принципиальную возможность трехмерного моделирования КНИ МОП-транзисторов с учетом эффектов искажения топологии затвора в процессе литографии.
2. Рекомендации по улучшению сходимости и повышению точности процесса трехмерного приборно-технологического моделирования электрических характеристик КНИ МОП-транзисторов, основанные на учете снижения подвижности носителей на границе окисел-кремний, выполняемом с помощью предварительного двумерного моделирования, и на управлении шагом сходимости, максимальным количеством итераций и т.п.
3. Метод определения эквивалентной ширины канала транзистора, заключающийся в построении линейной аппроксимации зависимости тока насыщения от геометрической ширины канала и прибавлении к геометрической ширине канала отношения свободного члена полученной линейной зависимости к ее угловому коэффициенту.

**Практическая значимость и результаты внедрения.** Практическая значимость работы состоит в том, что ее результаты позволяют:

1. Сократить время приборно-технологического моделирования в системе TCAD Sentaurus субмикронных элементов КНИ СБИС в ряде случаев на два порядка (от нескольких недель до нескольких часов).
2. Повысить на 10 – 50% точность схемотехнического SPICE-моделирования КНИ МОП СБИС за счет уточнения эквивалентной ширины канала по отношению к заложенной при проектировании.
3. Увеличить быстродействие СБИС на 10% за счет использования фигур оптической коррекции эффекта близости, спроектированных при совместном литографическом и приборно-технологическом моделировании.
4. Реализовать возможность моделирования электрических характеристик КНИ МОП-структур с учетом литографических эффектов на основе сопряжения САПР литографического и приборно-технологического моделирования.

Методика и результаты моделирования, полученные в работе, внедрены в процесс проектирования элементной базы субмикронных СБИС в НИИСИ РАН и в учебный процесс МГТУ имени Н.Э. Баумана.

**Апробация работы.** Результаты работы были представлены на Международных молодежных научно-технических конференциях «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы» (Москва, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011), журнале «Технология и конструирование в электронной аппаратуре» (Одесса, 2007), сборнике «Информатика и системы управления в XXI веке», журнале «Вестник МГТУ имени Баумана» (Москва, 2011). Принята к печати статья в журнале «Микроэлектроника» №1 за 2012 год (из перечня изданий, рекомендованных ВАК РФ).

Работа отмечена 2 дипломами 1 степени Международных молодежных научно-технических конференций «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы», (Москва, 2007) и «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы», (Москва, 2009). За выполненную работу автору присуждалась стипендия Правительства РФ.

Результаты исследования были представлены на IX, X и XI научно-практических семинарах «Проблемы создания специализированных радиационно-стойких СБИС на основе гетероструктур», проходивших в Нижнем Новгороде в 2009, 2010 и 2011 г.

**Публикации.** По материалам и основному содержанию работы имеется 9 публикаций в научно-технических журналах и трудах международных конференций, в том числе 1 статья в издании, рекомендованном ВАК РФ.

**Личный вклад соискателя.** Из перечня публикаций, выполненных в соавторстве, лично Глушко А.А.:

– в работе [1] проанализированы проблемы моделирования субмикронных КМОП-структур, входящих в состав СБИС, и процессов их формирования;

– в работе [7] предложена методика комплексного двумерного и трехмерного моделирования КНИ МОП-транзисторов, а также предложен метод определения эквивалентной ширины канала транзистора;

– в работе [9] предложена модель подвижности в поликристаллическом кремнии и предложена модель подвижности в поликристаллическом кремнии и методика проведения эксперимента по уточнению ее параметров.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка. Общий объем диссертации 128 страниц, содержит 67 рисунков, 4 таблицы, список использованных источников из 63 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснована актуальность моделирования субмикронных КНИ МОП-транзисторов, сформулирована цель и задачи исследования и изложена структура диссертационной работы.

**Первая глава** диссертации посвящена проблемам проектирования элементной базы КНИ КМОП СБИС с субмикронными проектными нормами и технологических процессов изготовления СБИС, анализу систем автоматизированного проектирования, позволяющих моделировать как процесс формирования, так и электрические характеристики элементов СБИС.

Рассмотрены особенности проектирования технологических процессов и конструкций элементов СБИС, определен круг задач диссертационной работы.

Технологический процесс изготовления субмикронных СБИС должен удовлетворять нескольким основным требованиям. Во-первых, термические процессы изготовления СБИС должны проводиться при достаточно низких температурах (порядка 900 – 950 °С), что позволяет свести к минимуму диффузию легирующих примесей в горизонтальном и вертикальном направлениях. Второе важное требование состоит в обеспечении малых сопротивлений областей элементов СБИС, проводящих дорожек и контактов. Паразитные сопротивления и емкости могут приводить к существенному снижению быстродействия СБИС. И, наконец, третьим требованием, необходимым для изготовления СБИС с субмикронными размерами структур, является учет эффекта оптической близости в процессе литографии.

Наиболее значимым методом проектирования СБИС становится приборно-технологическое моделирование элементной базы и технологических процессов. Моделирование основано на решении фундаментальных уравнений физики методом конечных элементов в специализированных САПР, получивших название TCAD, и является одним из наиболее гибких инструментов, позволяющим определить такие ограничения на задаваемые технологические режимы, при которых электрические параметры элементов СБИС будут находиться в заданных пределах [1]. Экспериментальные данные при этом сопоставляются с результатами моделирования и дается оценка ошибки прогноза конкретной характеристики элемента СБИС.

Существующая в применяемой системе TCAD Sentaurus методика трехмерного моделирования состоит в разделении всех операций технологического процесса на топографические операции (осаждение, травление и нанесение маски) и операции легирования, включающие ионное легирование и диффузию примеси. При этом на первом этапе выполняется геометрическое моделирование топографических операций, а затем в уже сформированной структуре выполняется моделирование операций легирования. Такая методика моделирования упрощает формирование трехмерной структуры, однако при этом полностью исключается возможность трехмерного моделирования операции термического окисления.

Задачу проектирования КНИ МОП-транзисторов на основе существующей методики усложняют и особенности их геометрии. Дело в том, что во избежание эффектов плавающего кармана необходимо обеспечить надежный электрический контакт к карману транзистора. Топологии КНИ МОП-транзисторов с контактом к карману представлены на рисунках 1а – 1в. По степени влияния процесса литографии на топологию затвора следует выделить транзисторы с прямым (А-типа) и непрямым (Н-типа и О-типа) затвором. В TCAD не предусмотрен учет литографических эффектов при моделировании технологического процесса формирования элементов СБИС.

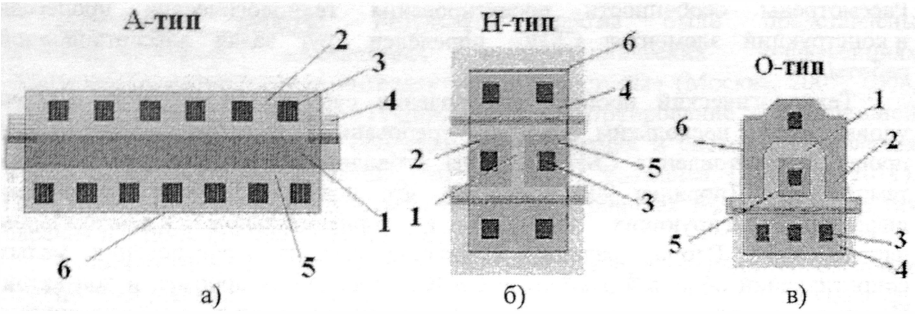


Рисунок 1. Топологии КНИ МОП-транзисторов различных конструкций: 1 – область затвора, 2 – область истока, 3 – область контактного окна, 4 – сильнолегированная область для обеспечения контакта к карману, 5 – область стока, 6 – граница области транзистора

Кроме того, без необходимых инструкций система TCAD может назначать такие значения параметров сетки конечных элементов, при которых структура может быть качественно искажена. Слишком большие «ячейки» сетки не позволяют выявить, что происходит внутри «ячейки», а слишком малые «ячейки» приводят к существенным временным затратам при моделировании. Возникает задача поиска компромисса между временем и точностью моделирования. И наконец, время моделирования может достигать нескольких суток и даже недель из-за неудачно выбранных параметров численных методов, а в ряде случаев без вмешательства пользователя система завершает процесс счета с ошибкой, вызванной расходимостью численных методов.

Большая часть модулей TCAD ориентированы на составление пользователем программы моделирования, описываемой на внутренних языках системы. Кроме того, в TCAD возможна разработка собственных модулей на языке TCL, позволяющих взаимодействовать со стандартными компонентами. Пользователю доступно и добавление новых моделей в систему моделирования электрических характеристик на основе объектно-ориентированного программирования на языке C++.

Повышение точности моделирования связано с разработкой метода построения сетки и последующей калибровкой применяемых моделей на технологическом процессе с проектными нормами 0,35 мкм. Верификацию применяемых моделей предложено проводить на независимом технологическом процессе с минимальными проектными нормами 0,25 мкм.

На основе результатов приборно-технологического моделирования транзисторов с прямым и непрямым затвором становится возможным уточнение наиболее важных параметров, применяемых при схемотехническом моделировании, таких, например, как эквивалентная ширина канала.

**Во второй главе** предложена методика трехмерного моделирования КНИ МОП-транзисторов, включающая: особенности преобразования топологии затвора; правила описания геометрических областей и формирования профиля в кармане; особенности генерации сетки для корректного моделирования

операции диффузии примеси и рекомендации по улучшению сходимости и повышению точности процесса трехмерного приборно-технологического моделирования электрических характеристик КНИ МОП-транзисторов. Проанализированы используемые модели технологических операций и физических процессов, протекающих в МОП-структурах. Математическая модель транзистора представлена системой дифференциальных уравнений в частных производных, включающей (для наиболее простого случая) уравнение Пуассона и два уравнения непрерывности:

$$div\, \varepsilon\, grad\, \psi = -q\,(p - n + N_{D+} - N_{A-})$$

$$div\, \overline{J_n} = -q(G - R) + q\frac{\partial n}{\partial t},$$

$$div\, \overline{J_p} = q(G - R) + q\frac{\partial p}{\partial t},$$

где $\varepsilon$ - диэлектрическая проницаемость вещества, для которого решается уравнение, $q$ – заряд электрона, $p$ и $n$ - концентрации электронов и дырок, $N_{D-}$ и $N_{A-}$ - концентрации ионизированных атомов донорной и акцепторной примесей, соответственно, $\overline{J_n}$ и $\overline{J_p}$ - векторы плотности соответственно электронного и дырочного токов, $G$ – скорость генерации носителей, $R$ – скорость рекомбинации носителей, $t$ – время, $\psi$ – электростатический потенциал.

Решение системы дифференциальных уравнений в TCAD основано на применении метода конечных элементов, связанного с дискретизацией решаемых дифференциальных уравнений в частных производных, приведенных к виду $\nabla\vec{A} + R = 0$, где $\vec{A}$ – вектор неизвестного параметра, $R$ – внешнее воздействие. В результате дискретизации получается система уравнений:

$$\sum_{j \neq i} k_{ij} a_{ij} + \Omega_i r_i = 0,$$

где $i$ и $j$ – номера соседних конечных элементов, $k_{ij}$ и $\Omega_i$ - параметры, определяемые геометрическими размерами конечных элементов, $a_{ij}$ – разность неизвестных параметров в узлах сетки, $r_i$ – значения внешних воздействий в узлах. Таким образом, количество решаемых уравнений зависит от количества узлов сетки конечных элементов, которое, в свою очередь, определяется числом вершин в топологии затвора и способом построения сетки.

При моделировании структуры транзисторов с непрямым затвором с учетом литографических искажений топологии возникает неприемлемое для приборно-технологического моделирования количество вершин топологии затвора (порядка 800 – 900). Поэтому возникает необходимость их сокращения. В качестве ограничения на основе вычислительных экспериментов определено, что для успешного моделирования в системе TCAD необходимо, чтобы исходная топология затвора насчитывала не более 70 вершин при использовании вычислительного сервера с объемом оперативной памяти 16 Гбайт. Сокращение количества вершин в топологии затвора предлагается

реализовать на основе алгоритма ветвей и границ. Считается, что вершина может быть удалена из топологии, если выполнены следующие условия для трех последовательно соединенных вершин топологии $A(x_A,y_A)$, $B(x_B,y_B)$ и $C(x_C,y_C)$ (см. рисунок 2):

$$\begin{cases} c(B,\ \ AC) < Error \\ |AC| < \lambda / 2 \end{cases}$$

Здесь *Error* – допустимая величина отклонения от исходной топологии, определяемая вычислительными возможностями системы и технологическим разбросом линейных размеров после операции литографии, $\rho(B, AC)$ – расстояние от точки $B$ до отрезка $AC$, $\lambda$ – проектная норма ($\lambda$=0,25 мкм). Второе условие накладывается для сохранения вершин, находящихся на расстоянии, сравнимом с проектной нормой (например, на разрезе топологии многосвязной области).

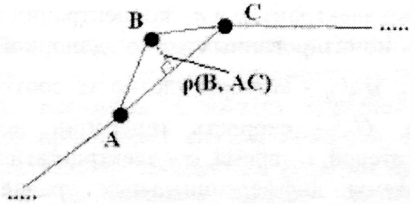


Рисунок 2. К пояснению принципа удаления избыточных вершин

Предлагаемая архитектура системы сопряжения литографического и приборно-технологического моделирования (TCAD) представлена на рисунке 3.

Изложены предлагаемые принципы описания трехмерной структуры с формированием дополнительных топологических масок (слоев) DELTA и CHANNEL. Обе маски формируются на основе изменения размера слоя поликремния POLY на заданную величину и последующих операций объединения и вычитания множеств, применяемых к топологическим слоям. Маска DELTA используется при автоматизированной генерации описания геометрических областей, а маска CHANNEL может быть использована для определения области канала КНИ МОП-транзистора при генерации сетки, предназначенной для моделирования электрических характеристик. Геометрия предлагаемых масок на примере транзистора О-типа, представлена на рисунке 4.

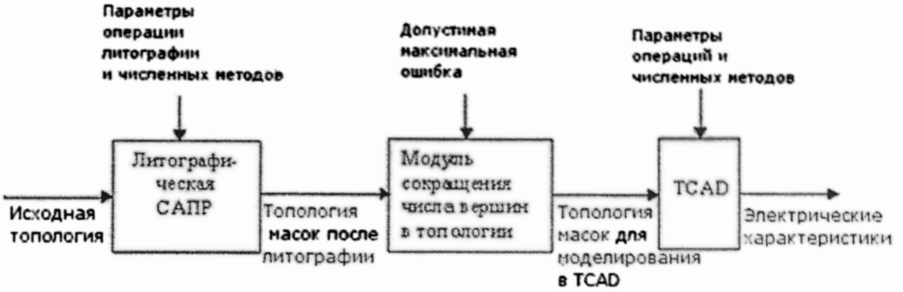


Рисунок 3. Предлагаемая архитектура системы сопряжения литографического и приборно-технологического моделирования

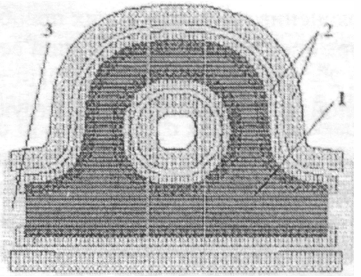


Рисунок 4. Топологии дополнительных масок DELTA и CHANNEL для транзистора О-типа: 1 – маска поликремния, 2 – маска DELTA, 3 – маска CHANNEL

Центральным вопросом главы стал принцип генерации сетки для трехмерного моделирования операций диффузии примеси, поскольку существующий способ построения сетки путем выделения областей структуры параллелепипедами обладает рядом недостатков. Дело в том, что при обработке криволинейных областей параллелепипедами неминуемо получение либо избыточного числа узлов сетки, либо его недостаточного количества. Кроме того, определение координат вершин параллелепипедов сопряжено с необходимостью обработки в «ручном» режиме и, как следствие, возможными субъективными ошибками.

Предлагаемый способ построения сетки вытекает из следующих предпосылок. Поскольку в транзисторах точки с одинаковой концентрацией примеси должны лежать на линиях, параллельных границе области затвора транзистора, можно считать, что наиболее подходящей для формирования сетки является криволинейная система координат, в которой одна из осей параллельна границе затвора.

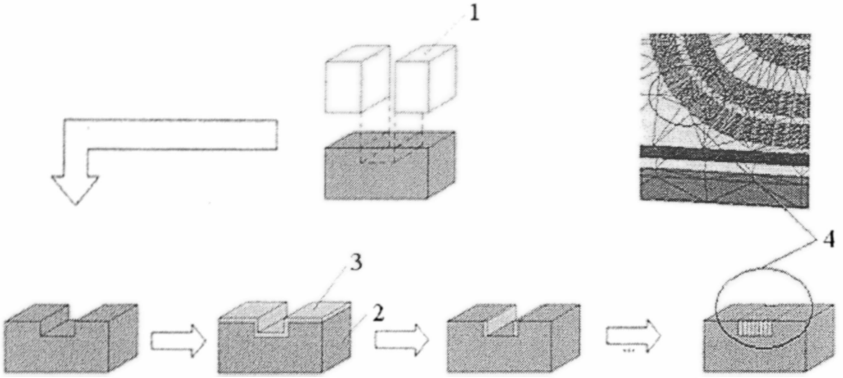


Рисунок 5. Пояснение геометрических преобразований структуры, используемых при формировании криволинейной сетки конечных элементов: 1 – маска DELTA; 2 – фрагмент области МОП-структуры; 3 – осажденный слой; 4 – сформированная структура

При генерации макроэлементов такие линии можно создать искусственно, формируя в структуре модели тонкие «полоски» полупроводникового материала, толщина которых равна требуемому шагу сетки. Эти полоски могут быть получены путем предварительного «вытравливания» канавки, расположенной вдоль будущей границы затвора, и последующего цикла заполнения этой канавки тем же материалом. Повторяющийся элемент цикла должен в этом случае представлять собой «осаждение» на величину шага сетки и его последующее «травление». В этом случае «полоски» формируются сразу с двух сторон от предварительно вытравленной канавки по маске DELTA. Формируемые «полоски» в вертикальном сечении имеют форму прямоугольника (рисунок 5) [6].

Особенностью моделирования электрических характеристик является чувствительность к выбору начального приближения, выражающаяся иногда в существенных временных затратах и неудачном завершении моделирования из-за неустойчивости процесса счета.

Предложены методы обеспечения устойчивости процесса счета на основе исследований, проведенных в работах [3] и [4]. Сущность предложенных методов заключается в разбиении всего процесса моделирования на подпроцессы, в каждом из которых предъявляются определенные требования по точности, поиску начального приближения, шагу сходимости и максимальному количеству итераций.

Нарушение сходимости численных методов при трехмерном моделировании возникает и из-за необходимости учета эффектов снижения подвижности. Корректный учет этих эффектов возможен только при уменьшении шага сетки на границе окисел-кремний до величины порядка 0,0001 мкм. Однако такое уменьшение в трехмерной структуре приводит к риску деления на величину, близкую к нулю, и невозможности трехмерного моделирования электрических характеристик стандартными способами,

используемыми в системе TCAD Sentaurus.

Для разрешения этого противоречия предложен метод комплексного двумерного и трехмерного моделирования электрических характеристик КНИ МОП-транзисторов, позволяющий комбинировать достоинства как трехмерного, так и двумерного моделирования: трехмерное моделирование позволяет выполнить полный анализ структуры, а более высокие вычислительные возможности двумерного анализа позволяют уточнить результаты трехмерного моделирования [7].

**В третьей главе** освещены вопросы, связанные с разработкой алгоритмов формирования макроэлементов для моделирования процесса формирования КНИ МОП-структур. Выполнена калибровка моделей, заложенных в систему приборно-технологического моделирования. Разработана модель подвижности в поликристаллическом кремнии.

Разработан алгоритм, реализующий преобразование геометрии структуры транзистора для генерации криволинейной сетки конечных элементов. Реализация алгоритма ориентирована на подготовку в среде разработки TCAD Sentaurus дополнительного программного модуля на языке TCL, позволяющего взаимодействовать со стандартными средствами TCAD. Этот алгоритм представлен на рисунке 6.

Выполнена калибровка операций термического окисления и ионного легирования, от точности моделирования которых зависит точность последующего расчета электрических характеристик. Установлено, что при моделировании процесса ионного легирования важно учитывать эффект каналирования ионов примеси в кремниевую подложку. Расхождение между результатом моделирования и измеренным методом вторичной ионной масс-спектроскопии профилем легирования составило не более 20%.

На электрические характеристики сформированных структур существенное влияние оказывает подвижность носителей, в частности, подвижность носителей заряда в поликристаллическом кремнии, используемом в качестве материала затвора, а также для создания резисторов с отрицательным температурным коэффициентом. Рассмотрены вопросы подвижности носителей заряда в поликристаллическом кремнии [8]. При расчете температурной зависимости подвижности носителей предполагается, что все кристаллиты представляют собой кубические структуры с одинаковой длиной ребра $L$. Концентрация легирующей примеси равна $N$.

Значительный вклад в ток, протекающий через границу зерна, дает термоэлектронная эмиссия. Эффективная подвижность $\mu_{eff}$ в этом случае определяется как

$$\mu_{eff} = \frac{Lq}{\sqrt{2\,\pi mkT}} exp\left(-\frac{V_b}{kT}\right),$$

где $k$ – постоянная Больцмана, $T$ – абсолютная температура, К; $m$ – эффективная масса заряженных частиц, кг, $q$ – элементарный заряд электрона, $V_b$ – высота потенциального барьера, $L$ – длина ребра кристаллита. На основе этой зависимости сформулирован подход к поиску неизвестных параметров модели

для ее добавления в систему TCAD Sentaurus [5]. Модель добавлена в систему на основе объектно-ориентированного подхода разработки пользовательских моделей на языке программирования C++.

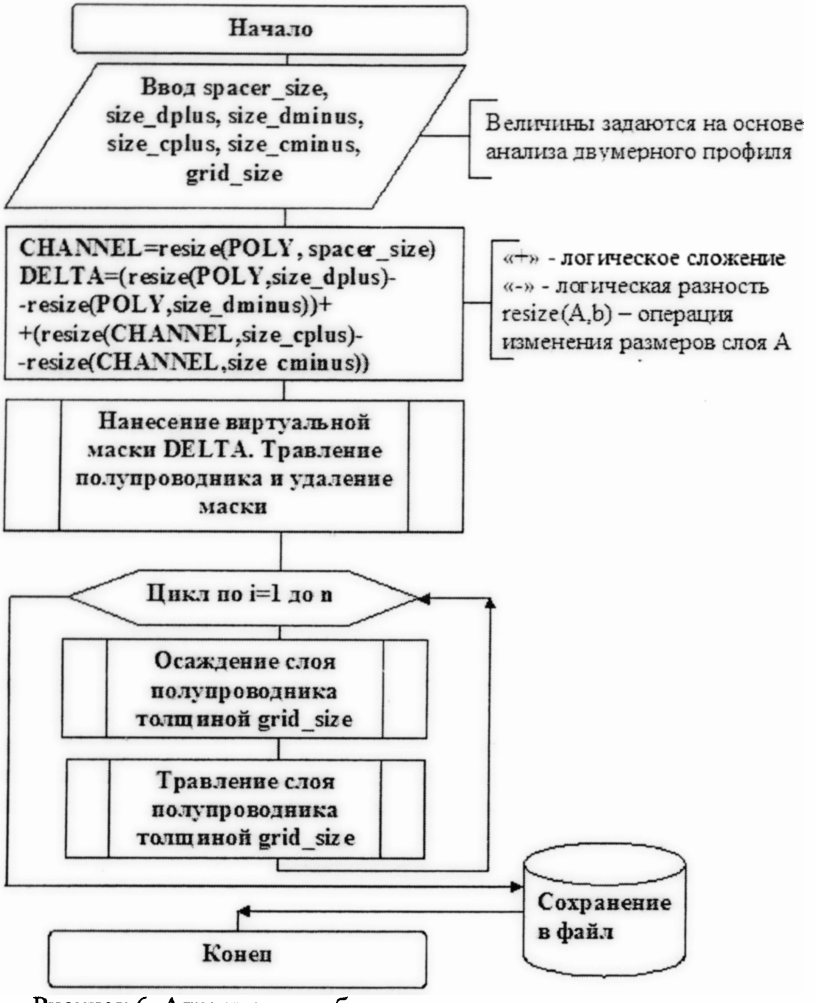


Рисунок 6. Алгоритм преобразования структуры для генерации криволинейной сетки

Проведено исследование КНИ МОП-транзисторов с прямым затвором. Предложен метод определения эквивалентной ширины канала (для калибровки модели подвижности носителей заряда в канале) в транзисторе с прямым затвором [7] на основе линейной аппроксимации зависимости токов насыщения транзистора от геометрической ширины канала:

$$I_d = W \cdot J_d + \Delta I_d = J_d \cdot (W + \frac{\Delta I_d}{J_d}) = J_d \cdot W_{экв},$$

где $W_{экв}$ – эквивалентная ширина канала в мкм, $W$ – геометрическая ширина канала в мкм, $I_d$ – ток насыщения транзистора в А, $J_d$ – приведенный ток насыщения (угловой коэффициент линейной аппроксимации зависимости токов насыщения транзистора от геометрической ширины канала) в А/мкм, $\Delta I_d$ – свободный член линейной зависимости в А [2; 7].

**В четвертой главе** описаны особенности программной реализации разработанных алгоритмов, и на основе изложенной методики выполнено приборно-технологическое моделирование структур с непрямым затвором.

Упрощенная структура системы моделирования представлена на рисунке 7.

Рисунок 7. Реализация алгоритмов на основе взаимодействия модулей, реализованных на TCL и языке компонента Inspect, со стандартными средствами TCAD

Реализация описанных ранее алгоритмов выполнена в среде TCAD с использованием программных модулей, разработанных на языке TCL, взаимодействующих со стандартными средствами TCAD Sentaurus.

Алгоритм построения геометрической структуры макроэлементов реализован на основе взаимодействия модулей на языке TCL, осуществляющих управление генерацией дополнительных топологических слоев DELTA и CHANNEL и формирование командного файла заполнения канавки, со стандартными средствами TCAD. Предложенный алгоритм для наиболее сложной конструкции транзистора О-типа позволил получить сетку с количеством узлов ~50 000, что почти на 50% меньше по сравнению с результатом применения существующего способа генерации сетки, позволяющего получить около 100 000 вершин. Алгоритм комплексного двумерного и трехмерного моделирования реализован на языке программного компонента Inspect, встроенного в TCAD.

Расчет транзисторов проводился для двух случаев: с предварительной коррекцией эффекта оптической близости (ОРС) и без его учета [9]. Результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными данными, полученными на тестовом кристалле в рамках ОКР, выполненных в НИИСИ РАН, по проектированию КНИ КМОП-технологии с минимальными проектными нормами 0,25 мкм.

На рисунке 8 показаны расчетные и экспериментальные пороговые характеристики транзисторов, выполненных с использованием ОРС (дополнительных фигур коррекции топологии перед операцией литографии) и без ОРС. Планки погрешностей на рисунке – 10%.

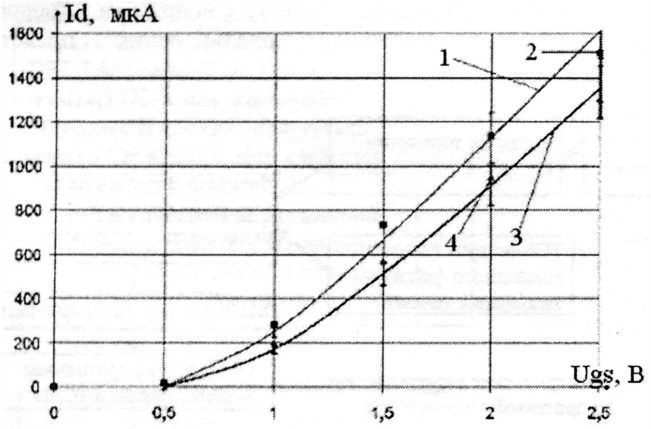


Рисунок 8. Сравнение результатов моделирования n-канальных транзисторов О-типа с экспериментальными данными: 1 – результат моделирования транзистора с ОРС, 2 – экспериментальные данные транзистора с ОРС, 3 – результат моделирования транзистора без ОРС, 4 – экспериментальные данные транзистора без ОРС

Как видно из рисунка 7, расхождение между результатами моделирования и экспериментальными данными составляет не более 10%. Кроме того, моделирование показало, что токи насыщения выше в случае учета эффекта оптической близости за счет сближения области истока и стока на всем протяжении канала.

**В разделе «выводы и заключение»** представлены основные результаты работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложена и практически реализована методика трехмерного моделирования технологического процесса формирования КНИ МОП-транзисторов и их электрических характеристик, позволяющая с высокой точностью рассчитывать характеристики проектируемых структур субмикронных технологий КНИ КМОП СБИС. Точность предложенной методики подтверждена 10 – 20%-ми расхождениями между результатами моделирования процесса формирования транзисторных структур и результатами реальных измерений профилей легирования и толщин подзатворного окисла, а также 10%-ми расхождениями между расчетными и экспериментальными электрическими характеристиками транзисторов. Методика моделирования апробирована в НИИСИ РАН для структур с проектными нормами 0,35 – 0,25 мкм.

2. Предложен метод построения сетки конечных элементов при трехмерном моделировании, позволивший сократить число ее узлов на 50%, отличающийся от известных введением разбиения узлов сетки вдоль границ криволинейных областей моделируемых структур.

3. Впервые реализован учет особенностей процесса литографии при проектировании конструкций КНИ МОП-транзисторов с прямым и непрямым затвором, предложен метод определения их эквивалентной ширины канала. Реализовано совместное использование САПР литографического и приборно-технологического моделирования.

4. Предложен математический аппарат и алгоритмы обработки топологии и преобразования структуры, позволяющие реализовать моделирование диффузионного профиля транзисторной структуры с учетом искажений топологии в процессе литографии. Алгоритмы реализованы в виде программных модулей на языке TCL, позволяющие генерировать командный файл формирования геометрической структуры макроэлементов. Совместное использование этих программных модулей со стандартными средствами TCAD позволяет реализовать метод построения криволинейной сетки конечных элементов.

5. Разработаны рекомендации по улучшению сходимости численных методов при трехмерном моделировании электрических характеристик элементов КМОП КНИ СБИС в системе TCAD, позволяющие сократить время счета на два порядка – от нескольких недель до нескольких часов. Предложен алгоритм вычислений, позволяющий учитывать результаты двумерного моделирования при трехмерном моделировании, реализованный в виде программного модуля на языке компонента Inspect, позволяющий сопоставлять результаты двумерного и трехмерного моделирования и реализовать комплексное двумерное и трехмерное моделирование.

6. Выполнена калибровка моделей, заложенных в систему TCAD. В систему TCAD добавлена модель подвижности носителей в поликристаллах кремния, позволившая снизить в 10 раз погрешность расчета сопротивления поликремниевого резистора по сравнению с ранее используемой моделью.

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

**1.** Глушко А.А., Родионов И.А., Макарчук В.В. Моделирование технологии изготовления субмикронных КМОП СБИС с помощью систем TCAD // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2007. №4. С.32 – 34.

**2.** Глушко А.А. Исследования температурных полей КМОП-структур// НАНОИНЖЕНЕРИЯ-2008: Сборник трудов первой Всероссийской Школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «НАНОИНЖЕНЕРИЯ». М., 2008. С. 153 – 156.

**3.** Глушко А.А. Анализ сходимости модифицированного метода Ньютона, применяемого в системе TCAD // Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2008: Сборник трудов 10-ой Международной научно-технической конференции. М., 2008. С.148 – 150.

**4.** Глушко А.А. Проблемы моделирования субмикронных структур в системе TCAD// НАНОИНЖЕНЕРИЯ-2008: Сборник трудов первой Всероссийской Школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «НАНОИНЖЕНЕРИЯ». М., 2008. – С. 226 – 229.

**5.** Глушко А.А. Моделирование резистивных структур, сформированных на основе поликристаллического кремния // Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2010: Сборник трудов 12-ой Международной научно-технической конференции. М., 2010. С.164 – 166.

**6.** Глушко А.А. Особенности генерации сетки конечных элементов при трехмерном моделировании технологического маршрута изготовления субмикронных КНИ КМОП СБИС // Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2011: Сборник трудов 13-ой Международной научно-технической конференции. М., 2011. С.367 – 372.

**7.** Глушко А.А., Зотов С.К. Особенности калибровки моделей 3D-транзисторных КНИ МОП-структур // Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2011: Сборник трудов 13-ой Международной научно-технической конференции. М., 2011. С. 373-380.

**8.** Глушко А.А. Моделирование субмикронных КНИ МОП-транзисторов Н-типа // Информатика и системы управления в XXI веке: (М.) 2011. Сборник трудов №8 молодых ученых, аспирантов и студентов. С. 154 – 163.

**9.** Глушко А.А., Шахнов В.А. Параметры резистивных структур на поликристаллическом кремнии // Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана. Приборостроение. 2011. №1. С. 67 – 75.