

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»

На правах рукописи

Попов Дмитрий Александрович

**Приближенно-технологическое моделирование субмикронных МОП-транзисторов со
структурой кремний на изоляторе с учетом температурных и радиационных
эффектов**

05.13.12 – Системы автоматизации проектирования

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Петросянц Константин Орестович

Москва – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Глава 1 Анализ проблемы TCAD моделирования субмикронных МОПТ структур с учетом радиационных и температурных эффектов	13
1.1 Состояние работ в области TCAD моделирования с учетом радиационных и температурных эффектов.....	15
1.2 Методологические аспекты TCAD моделирования МОПТ структур с учетом влияния радиации и температуры.....	26
1.3 Оценка радиационной и температурной стойкости перспективных конструктивно-технологических разновидностей субмикронных МОП КНИ структур	33
1.4 Выводы по главе 1.....	39
Глава 2 TCAD-модель субмикронных и глубоко субмикронных МОПТ структур, учитывающая радиационные эффекты обусловленные воздействием гамма лучей, нейтронов и протонов	40
2.1 Учет влияния нейтронного и протонного излучения в МОП-структурах.....	40
2.2 Квази-трехмерная модель для расчета тока утечки в структурах КНИ МОПТ	46
2.3 Выводы по главе 2.....	54
Глава 3 TCAD модель субмикронных МОПТ с учетом эффектов саморазогрева и высоких и низких внешних температур.....	55
3.1 TCAD модель субмикронных МОПТ с учетом статического и динамического эффекта саморазогрева.....	55
3.2 Модель сдвига порогового напряжения МОПТ, обусловленного совместным влиянием внешней температуры и гамма излучения.....	60
3.3 Выводы по главе 3.....	63
Глава 4 TCAD-моделирование конструктивно-технологических разновидностей субмикронных КНИ МОПТ структур	64
4.1 Моделирование характеристик субмикронных МОПТ с асимметричным легированием канала	65
4.2 Моделирование характеристик субмикронных КНИ МОПТ структур с различной конфигурацией скрытого оксида	74
4.3 Выводы по главе 4.....	101
Глава 5 TCAD моделирование нанометровых МОПТ с high-k диэлектриком затвора	102
5.1 Физическая модель электро-физических эффектов в МОПТ структурах с high-k диэлектриком	103
5.2 Моделирование статических характеристик нанометровых high-k МОПТ	108
5.3 TCAD модель МОПТ с high-k диэлектриком затвора, учитывающая воздействие ионизирующего излучения	112
5.4 Выводы по главе 5.....	117

Глава 6 Применение разработанной библиотеки моделей в практике проектирования элементной базы радиационной и температурной стойких СБИС и БИС со структурой КНИ	119
6.1 Моделирование субмикронных КНИ МОПТ с учетом нейтронного воздействия	119
6.2 Оценка сбоеустойчивости ячеек КМОП СОЗУ на основе 0,24 мкм МОПТ КНИ структур с одно- и двухслойным скрытым диэлектриком с учетом воздействия гамма излучения	120
6.3 Прогнозное моделирование ВАХ субмикронных КНИ МОПТ, изготовленных по отечественным КМОП технологиям с учетом саморазогрева и высокотемпературных эффектов	122
6.4 Моделирование КНС МОП-транзисторов на основе отечественной технологии	125
6.5 Выводы по главе 6.....	132
Заключение	134
Перечень сокращений	137
Список использованной литературы	138
Приложение 1	161
Приложение 2	163
Приложение 3	164

Введение

Актуальность темы.

Важным, постоянно расширяющимся сектором рынка электронных компонентов, являются приборы и схемы экстремальной электроники, работающие в условиях воздействия радиации и температуры. Такие схемы и приборы используются как в гражданских применениях: авиационно-космической, автомобильной аппаратуре, системах контроля и управления атомными реакторами и другими высокоэнергетическими установками, устройствами глубинного бурения при добыче запасов нефти, газа, воды; приборами радиационной медицины, телеметрии и др., а также в военных и других специальных применениях: системах вооружения и военной технике, комплексах по ликвидации аварий, экологических катастроф и др. В последнее время актуальность приборов и схем экстремальной электроники сильно возросла в связи с интенсивным развитием спутниковых систем связи и телекоммуникаций различного назначения.

Очевидно, что на всех этапах проектирования и разработки компонентов экстремальной электроники необходимо использование средств моделирования и САПР. Моделирование не только помогает обеспечить необходимый уровень параметров полупроводниковых приборов и ИС, но позволяет существенно сэкономить время, уменьшить трудоемкость и стоимость их разработки на этапе проектирования за счет корректной замены большого объема трудно получаемых экспериментальных данных на результаты расчетов с помощью ЭВМ.

При моделировании компонентов экстремальной электроники следует учитывать ряд усложняющих обстоятельств. Во-первых, многократно возрастает объем необходимых вычислений, поскольку расчеты проводятся не только для нормальных условий, а для достаточно большого набора температур и/или уровней радиации. Во-вторых, добавляется испытательное и измерительное оборудование, реализующее процедуру температурных и радиационных испытаний; причем, методики проведения эксперимента и измерений сложны, специфичны, а в ряде случаев уникальны. В-третьих, резко увеличивается объем измерений электрических характеристик, так как измерения необходимо проводить многократно – для каждой температуры и дозы, энергии или интенсивности

конкретного вида воздействия. Причем видов воздействия может быть несколько, так как в процессе эксплуатации в космических условиях они, как правило, действуют одновременно. В-четвертых, усложняются процедуры обработки результатов измерений. В-пятых, усложняется процесс принятия решения о функциональной пригодности прибора в реальных условиях эксплуатации, так как вводится дополнительный критерий оценки – степень деградации параметров прибора в условиях действия радиационных и/или температурных факторов.

К сожалению, серьезным фактором, ограничивающим возможности моделирования при использовании доступных для разработчиков коммерческих версий TCAD систем у нас в стране и за рубежом, является отсутствие адекватных TCAD моделей, учитывающих воздействие температуры и различных видов радиации. Литература по данному вопросу малочисленна, публикации часто носят противоречивый характер, а практические результаты, использующие данные эксперимента, не всегда публикуются в открытом доступе.

Последние десятилетия на рынке полупроводниковой микроэлектронике доминирующее положение занимает КМОП технология. Моделирование элементов КМОП БИС с помощью средств TCAD посвящено большое количество работ, в которых в основном рассматриваются стандартные МОПТ структуры на объемном кремнии или на КНИ подложках, работающее в нормальных внешних условиях.

Однако, целый ряд МОП-транзисторных структур, учитывающих специфику глубоко субмикронных и нанометровых приборов, в частности: с неравномерным профилем легирования канала, high-k диэлектриком затвора, с различной конфигурацией скрытого оксида и др. исследованы в недостаточной степени. Целый ряд специфических конструктивно-технологических разновидностей МОП-транзисторов, перспективных для КМОП схем с повышенной радиационной и температурной стойкостью вообще не исследован.

Поэтому основной целью данной работы является создание приборно-технологических моделей субмикронных и наноразмерных МОП-транзисторов и их конструктивно-технологических разновидностей, предназначенных для работы в условиях радиационных воздействий и расширенного диапазона температур.

Цель диссертационной работы и задачи исследования.

Целью диссертации является разработка моделей и развитие методов приборно-технологического моделирования объемных и КНИ субмикронных МОП-транзисторов с учетом температурных и радиационных эффектов.

Цель достигается за счет решения следующих задач:

1. Разработки методологии TCAD-моделирования МОПТ структур с учетом радиационных и тепловых эффектов.
2. Разработки библиотеки TCAD моделей электрофизических параметров п/п материалов и приборных структур, учитывающей влияние высоких и низких температур и различных видов радиации (нейтронов, γ -лучей, протонов).
3. Использования моделей п. 2 для анализа и расчета электрических характеристик различных субмикронных МОПТ структур, составляющих элементную базу для радиационно- и температурно-стойких СБИС.
4. Разработки эффективных подходов и методик моделирования 3-х мерных МОПТ структур, существенно сокращающих время и упрощающих трудоемкость моделирования.

Методы исследования: Для решения поставленных задач применены численные методы решения 2D и 3D дифференциальных уравнений в частных производных, методы аппроксимации и обработки результатов экспериментов.

Научная новизна работы.

1. В среде TCAD модернизированы существующие и разработаны новые радиационные и температурные модели для основных электрофизических параметров (времен жизни, подвижностей, скоростей рекомбинации носителей заряда, концентраций ловушечных уровней в оксиде и на границах кремний-оксид, электро- и теплопроводности и др.) современных субмикронных и нанометровых КНИ МОПТ структур.
2. Разработан комплект TCAD моделей для расчета электрических характеристик субмикронных и нанометровых КНИ МОПТ структур, учитывающих воздействие трех видов радиации: γ -лучей, нейтронов и протонов:

- в модель, учитывающую γ -излучение, по сравнению с ранее известными моделями введены новые более физические и полуэмперические зависимости от дозы излучения для эффективной подвижности, скорости поверхностной рекомбинации носителей заряда и плотности ловушек в диэлектрике и на границе раздела диэлектрик-полупроводник и др.;
 - в модель для нейтронов введены новые зависимости времени жизни и подвижности от величины флюенса нейтронов, эффективности инжекции носителей и концентрации легирующей примеси;
 - модель для протонов, разработана впервые и учитывает аддитивное влияние эффектов смещения и ионизации.
3. Разработан комплект электро-тепловых TCAD моделей субмикронных и нанометровых КНИ МОПТ структур, учитывающих эффекты “саморазогрева”, высоких (до 300°C) и низких (до -20°C) внешних температур, совместного воздействия температуры и ионизирующего излучения.
 4. Разработан метод, позволяющий существенно сократить время расчета ВАХ и радиационных токов утечки в КНИ МОПТ структурах, суть которого состоит в замене сложной задачи полного 3D моделирования на совокупность двух более простых задач: 2D моделирования основного транзистора и 3D моделирование сверхузкой области паразитного транзистора на границе Si-SiO₂ STI изоляции. Ранее для перечисленных КНИ МОПТ структур TCAD моделирование с учетом радиации и температуры не проводилось.

Практическая значимость работы.

1. Разработанная библиотека радиационных и температурных моделей включена в промышленную систему приборно-технологического моделирования Sentaurus Synopsys TCAD и использована для проектирования различных конструкторско-технологических разновидностей МОП-транзисторов, составляющих основу радиационно-стойких и высокотемпературных КМОП КНИ БИС.
2. Проведен анализ электрических характеристик ряда перспективных КНИ МОП-транзисторов с точки зрения их стойкости к воздействию радиации и температуры. При воздействии радиации рассмотрены структуры:
 - с high-k диэлектриком затвора (HfO₂);

- с областью собственной проводимости в канале;
- с различной конфигурацией скрытого оксида на основе кремния (SELBOX, PSOI, Quasi-SOI, Double SOI).

При воздействии температуры рассмотрены структуры:

- КНИ МОПТ, изготовленные по специальной технологии высокотемпературных КНИ КМОП БИС;
- со скрытым оксидом на основе материалов с высокой теплопроводностью (Al_2O_3), AlN, Si_3N_4).

Использование результатов работы.

Результаты диссертации использованы на предприятиях филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова», ДЦ «ПМС» МИЭТ, ФГБНУ «НИИ ПМТ» при выполнении следующих х/д НИР:

1. «Разработка физических моделей приборного моделирования характеристик субмикронных транзисторов КМОП КНИ с учетом воздействия спецфакторов» (2015 г.).
2. «Исследование и разработка радиационных моделей элементов кремний-германиевых аналого-цифровых БиКМОП СБИС для проектирования космической радио- и телекоммуникационной аппаратуры» (2015 г.).
3. «Исследование и разработка технологий элементной базы высокотемпературной микро и наноэлектроники» (2015 г.).
4. Разработка методов многоуровневого исследования и моделирования элементов перспективных изделий микроэлектроники от уровня материала до уровня схем с повышенной стойкостью к температурным и радиационным воздействиям» (2013 г.).
5. «Разработка физических моделей приборного моделирования характеристик субмикронных транзисторов КМОП КНИ с учетом воздействия спецфакторов» (2012 г.).

Результаты диссертации использовались при выполнении работ по семи грантам Научного Фонда НИУ ВШЭ и РФФИ, в том числе совместного российско-китайского проекта по исследованию и моделированию глубоко субмикронных и нанометровых КМОП структур:

1. «Экспериментальное и теоретическое исследование и моделирование наноразмерных полупроводниковых приборов с учетом влияния различных факторов радиации» совместно РФФИ и Фонд научных исследований Китая (2020 г.).
2. «Комплексное мультифизическое моделирование базовых конструкций и технологий нового поколения микроминиатюрных, микроощных полупроводниковых фото- и бета-вольтаических элементов питания и сенсоров с длительным сроком службы для автономных медицинских и технических систем различного назначения» (2019 г.).
3. «Комплексное моделирование взаимосвязанных электро-тепловых, электромагнитных, фотоэлектрических и радиационных эффектов и явлений в приборах, схемах и системах электроники, микро- и наноэлектроники» (2018 г.).
4. «Мультифизическое моделирование полупроводниковых приборов и интегральных схем, работающих в экстремальных условиях» (2018 г.).
5. «Разработка методов, моделей и баз данных для проектирования электронных компонентов ЭВМ и РЭА космического назначения (полупроводниковых приборов, микросхем, СБИС, печатных плат) с учетом радиации и температуры» (2014 г.).
6. «Исследования характеристик субмикронных и глубоко субмикронных кремний-германиевых биполярных и МОП гетероструктурных транзисторов аналого-цифровых Би-КМОП СБИС для радио- и телекоммуникационных систем» (2012 г.).
7. «Поисковые исследования в области СВЧ БИС на основе кремний-германиевых гетероструктур для систем беспроводной связи и радарной техники» (2012 г.).

Положения, выносимые на защиту.

1. Маршруты TCAD моделирования электрических характеристик субмикронных МОП-транзисторов на объемном кремнии и КНИ подложках с учетом влияния

температурных и радиационных эффектов, а также структуры программных блоков в среде TCAD, реализующие эти маршруты.

2. Комплекс температурных моделей электрофизических параметров п/п структур МОПТ, в которые встроены новые зависимости теплопроводности в расширенном диапазоне температур (от 20 К до 600 К) с учетом степени легирования и толщины активной области канала, играющие важную роль для приборов с глубоко субмикронными и нанометровыми размерами.
3. Комплекс радиационных моделей электрофизических параметров п/п структуры МОПТ, учитывающих эффекты, обусловленные влиянием нейтронов, γ -лучей, протонов.
4. Квази-трехмерная TCAD модель для расчета ВАХ и радиационных токов утечки субмикронных КНИ МОПТ структур, применение которой позволяет на порядок сократить время моделирования в системе TCAD по сравнению со стандартным полностью 3-х мерным подходом.
5. TCAD модели глубоко субмикронных и нанометровых МОПТ структур с high-k диэлектриком затвора на основе HfO_2 , неравномерным легированием канала, встроенной областью собственной проводимости в канале, с различной конфигурацией скрытого оксида, а также результаты расчета структур конкретных приборов с помощью TCAD Synopsys Sentaurus.

Достоверность полученных результатов подтверждается:

- 1) Достаточным для практических расчетов совпадением результатов моделирования с экспериментальными характеристиками всех типов МОПТ структур, рассмотренных в диссертации, в исследуемых диапазонах температур и уровней радиационных воздействий;
- 2) Данными опубликованных аналогичных работ отечественных и зарубежных специалистов, подтверждающими результаты, полученные в диссертации;
- 3) Положительным опытом использования разработанных в диссертации моделей в практике проектирования субмикронных МОПТ структур для радиационно- и температурно-стойких ИС, разрабатываемых на отечественных предприятиях.

Апробация результатов работы. Результаты данной работы докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

Отечественные конференции:

- Научный семинар «Элементная база СБИС: транзисторные структуры», Москва, Россия, февраль 2019 г.;
- XVIII Научно-практический семинар «Проблемы создания специализированных радиационно-стойких СБИС на основе гетероструктур», Нижний Новгород, Россия, май 2018 г.;
- Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника, микро- и наноэлектроника», Суздаль, Россия, 2018-2019 гг.;
- XV Всероссийская научно-техническая конференция «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА», Дубна, Московская область, сентябрь 2017 г.;
- Конференция «Научно-технические, инновационные разработки вузов для авиационно-космической отрасли России», Жуковский, Московская область, июль 2017 г.;
- Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» «СТОЙКОСТЬ-2016», Лыткарино, июнь 2016 г.;
- Научная сессия НИЯУ МИФИ-2015, Москва, апрель 2015 г.;
- Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов, «Микроэлектроника и информатика», Москва МИЭТ, 2013 и 2015 гг.;
- НТК студентов, аспирантов и молодых специалистов, Москва, МИЭМ НИУ ВШЭ, 2012-2015 гг.

Международные конференции:

- XIII Международная конференция "Кремний-2020" и XII Школа молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе, Республика Крым, Россия, сентябрь 2020 г.;
- Международный форум «Микроэлектроника-2019». Школа молодых ученых, Республика Крым, Россия, сентябрь 2019 г.;

- IEEE 22nd International Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits & Systems (DDECS), Cluj, Romania, April 2019;
- International Conference on Micro- and Nanoelectronics – 2018, Zvenigorod, Moscow Region, Russia, October 2018;
- III International Conference on Computer Simulation in Physics and beyond, Moscow, Russia, September 2018;
- International Conference on Microelectronic Devices and Technologies (MicDAT), Barcelona, Spain, 2018-2019;
- International Workshop on Reliability of Micro- and Nano-Electronic Devices in Harsh Environment (IWRMN-EDHE 2017), Chengdu, China, 2017;
- Международная конференция по микроэлектронике «ЭКБ и микроэлектронные модули», Крым, Алушта 2015-2017 гг.;
- International Conference on radiation effects on components and systems 2015 (RADECS 2015), Moscow, Russia, 14th-18th September 2015;
- XXV Международная конференция «Радиационная Физика Твёрдого Тела», Севастополь, 6 – 11 июля 2015 г.;
- IEEE EAST-WEST DESIGN & TEST SYMPOSIUM, Севастополь (2011) и Ростов-на-Дону (2013);
- II Международная научно-практическая конференция «Инновационные информационные технологии», Прага, 22 – 26 апреля 2013 г.;
- Международная конференция "Микро- и нанoeлектроника – 2012" (ICMNE-2012), Звенигород, Моск. обл., 1 – 5 октября 2012 г.

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в 35 печатных работах (в период с 2011 по 2020 гг.), из которых 6 в изданиях, входящих в перечень ВАК, 10 в изданиях, входящих в перечень Scopus/Web of Science и 5 работ опубликовано без соавторов.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, перечня сокращений, списка цитируемой литературы. Объём работы составляет 164 страницы (включая приложения), в том числе 97 рисунков, 18 таблиц.

Глава 1 Анализ проблемы TCAD моделирования субмикронных МОПТ структур с учетом радиационных и температурных эффектов

В современных коммерческих версиях универсальных TCAD симуляторов Sentaurus (Synopsys) [1] и ATLAS (Silvaco) [2] предусматривается учет радиационных и температурных эффектов. Кроме того, существует специализированный TCAD симулятор, ориентированный на расчет только радиационных эффектов в МОПТ структурах COGENDA [3].

Анализ существующих публикаций показывает, что различные версии этих симуляторов достаточно широко используются для расчета ВАХ с учетом влияния радиации и температуры. При этом для анализа тепловых процессов дизайнеры пользуются исключительно только теми возможностями, которые заложены в стандартных теплофизических моделях коммерческих симуляторов. Дополнительных моделей, учитывающие специфику теплофизических параметров глубоко субмикронных и нанометровых п/п структур не привлекаются.

Подавляющее количество публикаций по радиационному моделированию посвящено учету ионизационных эффектов, обусловленных влиянием гамма-излучения и одиночных ядерных частиц (ОЯЧ^{*}). Эффекты смещения в коммерческих версиях TCAD симуляторов учитываются слабо [2] или не учитываются вообще [1], что существенно ограничивает возможности симуляторов в части учета воздействия нейтронов и протонов.

Большинство работ по TCAD моделированию МОПТ структур с учетом радиации и температуры носят прикладной характер и узко ориентированы на конкретный тип конструкции и технологии прибора и исследование конкретного набора его характеристик.

Аналогичные работы различных авторов слабо связаны друг с другом, сравнение результатов, как правило, или носит формальный характер, или вообще не приводится.

* Влияние ОЯЧ является предметом самостоятельного исследования и в данной диссертации не рассматривается

Таким образом, в отличие от традиционного TCAD моделирования при нормальных условиях эксплуатации п/п прибора, методика которого в достаточной степени отработана и внедрена в практические расчеты, для успешной реализации TCAD моделирования в практике проектирования различных типов МОПТ структур, изготовленных по современным субмикронным и нанометровым технологиям, эксплуатация которых осуществляется в экстремальных условиях воздействия радиации и температуры, необходима разработка специальной методологии электро- и термо-радиационного моделирования, включающей в себя:

- 1) разработку отдельных маршрутов радиационного и теплового моделирования;
- 2) разработку маршрута смешанного радиационно-температурного моделирования;
- 3) разработку расширенной библиотеки радиационных и тепловых моделей для электрофизических параметров материалов и приборных структур;
- 4) разработку специального программного блока, реализующего диспетчерские функции выбора нужных моделей из соответствующих библиотек;
- 5) разработку упрощенных методов TCAD моделирования, учитывающих специфику 3D МОПТ структур, и существенно снижающих трудоемкость и время моделирования и обеспечивающих приемлемую для практики точность.

В данной главе приведен анализ современного состояния работ в области TCAD моделирования субмикронных и нанометровых МОПТ структур с учетом радиационных и тепловых эффектов. На основе этого анализа сформулированы модели, методы и подходы, которые включены в специализированную подсистему TCAD моделирования радиационно- и температурно-стойких МОПТ структур, изготавливаемых по перспективным технологиям.

1.1 Состояние работ в области TCAD моделирования с учетом радиационных и температурных эффектов

1.1.1 Радиационные эффекты

В коммерческих версиях TCAD симуляторов радиационные эффекты, обусловленные механизмами ионизации, учитываются путем добавления в классические выражения для скорости генерации-рекомбинации подвижных носителей заряда радиационно-индуцированной составляющей [4]:

$$G_r = \left(\frac{E+E_1}{E+E_0} \right)^m g_0 D, \quad (1.1)$$

где D – мощность дозы, g_0 – темп генерации электрон-дырочных пар, E_0 , E_1 и m - константы.

Для учета эффекта смещения рассчитывается количество дефектов, образованных заряженной частицей и атомами кристаллической решетки [2]:

$$N_F = \alpha_D \cdot E_L \cdot \text{Density} \cdot \text{Fluence}, \quad (1.2)$$

где α_D - коэффициент повреждения, который соответствует количеству дефектных состояний, созданных на единицу энергии, E_L – нелинейные потери энергии.

Однако, TCAD модели, базирующиеся на использовании исключительно выражений (1.1-1.2), пригодны только для приближенных оценок радиационной стойкости простейших МОПТ структур с микронными размерами.

Для современных субмикронных, глубоко субмикронных и нанометровых МОПТ структур помимо учета классических механизмов ионизации и смещения, необходимо учитывать зависимость основных электрофизических параметров п/п структуры прибора (подвижности $\mu_{эф}$, времени жизни носителей заряда $\tau_{эф}$, концентрации ловушек N_{it} и скорости поверхностной рекомбинации S_0 на границах Si/SiO₂, плотности заряда в диэлектрических слоях $Q_{от}$ и др.) от уровня радиационного воздействия. Учету этих зависимостей для TCAD моделирования МОПТ при воздействии на прибор различных видов радиации посвящен целый ряд отечественных и зарубежных работ.

А. Воздействия дозы γ -излучения.

Гамма-излучение является основной причиной ионизационных эффектов, возникающих в полупроводниковых структурах. В работах [5]-[10] исследовалось влияние за-

зависимостей физических параметров $\mu_{\text{эф}}$, $N_{\text{ит}}$, $Q_{\text{от}}$ от дозы γ -излучения на ВАХ различных субмикронных МОП-структур.

В работе С. Peng, Z. Hu и др. [5] с помощью Silvaco TCAD исследовали воздействия гамма излучение на 130 нм КНИ МОПТ. Основное внимание авторы уделили моделированию эффекта туннелирования через подзатворный диэлектрик.

В работе [6] разрабатывается компактную модель МОП-транзистора с учетом воздействия ионизирующего излучения. TCAD моделирование использовалось для верификации разработанной модели.

В работе [7] TCAD используется для исследования влияния положительного заряда в скрытом оксиде на радиационную модуляцию длины канала МОП-транзистора.

В работе Тихомирова и др. [8] моделировались деградация и обратимые отказы полупроводниковых приборов, обусловленные, в том числе и радиационными эффектами.

В работе Чаплыгин Ю.А., Крупкина Т.Ю. и др. [9] провели анализ особенностей использования средств приборно-технологического моделирования для расчета электрических характеристик элементов интегральных схем в условиях различных внешних воздействий.

В работе Смолин А.А. и др. [10] с помощью Sentaurus TCAD было рассмотрено влияние дозовых зависимостей параметров транзисторов на выходные характеристики КМОП ИС.

В работе Oldham T. R. и др. [11] проанализированы различия в результатах моделирования токов утечки МОПТ при воздействии γ - и X-излучений. В работе Hani Noorashiqin A. M. и др. [12] моделировалось воздействие γ -излучения на 180 нм МОПТ с различным легированием области канала. В Селецкий А. В., Шелепин Н.А. и др. [13] средствами TCAD исследовалось влияние технологического разброса электрофизических параметров на стойкость субмикронных МОПТ, подвергнутых γ -облучению.

В работе [14] коммерческая версия Sentaurus 3D TCAD использовалась для оценки радиационной стойкости MOSFET с Z-образной топологией затвора. Методом перебора учитывалось только влияние фиксированного заряда Q_{ox} в мелкой щелевой изоляции. Влиянием поверхностных состояний на границе Si/SiO₂ пренебрегали.

В работе [15] симулятор Silvaco ATLAS использовался для оценки радиационной стойкости новых 0,18 мкм DGA n-MOSFET структур. В стандартную модель была до-

бавлена плотность индуцированного заряда N_{ox} в SiO_2 STI; влиянием плотности дефектов N_{it} на границе раздела Si/SiO_2 пренебрегли. Используется метод перебора величин N_{ox} .

Ряд работ по TCAD моделированию субмикронных МОПТ структур выполнен с участием автора диссертаций [16]-[22] и др.

Детальный анализ вышеперечисленных работ показывает, что во всех работах использовались стандартные коммерческие версии TCAD симуляторов, в которых: 1) зависимости электрофизических параметров ($\mu_{эф}$, N_{it} , Q_{ot}) от дозы гамма-излучения задавались простейшим способом в виде таблицы. Подгонка результатов расчета под эксперимент осуществлялась пользователем методом простого перебора без какой-либо автоматизации; 2) в большинстве работ в качестве радиационных зависимостей для параметров ($\mu_{эф}$, N_{it} , Q_{ot} и др.) использовались результаты, полученные ранее для предыдущих поколений МОПТ, и малоприспособные для приборов с глубоко субмикронными и нанометровыми размерами, изготовленных по суперсовременным технологиям, таким как high-k gate МОПТ, UTB/UTBV (ultra thin BOX/ultra thin Body and BOX) и др.; 3) специальные модели для радиационно-зависимых электрофизических параметров ($\mu_{эф}$, N_{it} , Q_{ot} , $\mu_{эф}$, S_0), обеспечивающие расширение круга рассматриваемых МОПТ структур в область нанометровых размеров не разрабатывались.

В. Воздействие нейтронов.

Поток нейтронов вызывает смещение атомов кристаллической решетки п/п материалов и описывается в TCAD симуляторе ATLAS выражением (1.2). В коммерческой версии симулятора Sentaurus радиационно-индуцированные эффекты смещения в п/п материалах и структурах не учитываются. Кроме того, поток нейтронов существенным образом влияет на величину электрофизических параметров $\tau_{эф}$ и $\mu_{эф}$, что в симуляторах Sentaurus и ATLAS не учитывается. Отметим, что TCAD моделированию МОПТ структур при воздействии нейтронов посвящено всего несколько публикаций, что крайне не достаточно. В частности, в [23] авторы исследуют влияние воздействия нейтронного облучения на сбоеустойчивость D триггера на основе КНИ МОПТ структур. Однако, в работе в первую очередь речь идет о моделировании с помощью TCAD влияния накопленного в оксиде заряда на пороговое значение линейных потерь энергии, а не конкретно про влияние эффектов смещения. В другой работе [24] с помощью Silvaco TCAD исследовано влияние воздействия нейтронов на открытие паразитного биполярного транзи-

стора в МОПТ структуре. И в этой работе тоже эффектам смещения уделено не достаточно внимания.

Такая ситуация является прямым следствием общепринятого положения, что воздействие нейтронов не оказывает значительного влияния на работу МОП-транзисторов, а наиболее чувствительны к данному виду излучения биполярные транзисторы. Однако, в последних публикациях показано, что в ряде случаев влияние нейтронов следует учитывать не только для мощных МОП-транзисторов [25], но и для МОПТ структур с малыми и сверхмалыми размерами [23], [26].

С. Воздействие протонов.

Протоны являются наиболее сложным для моделирования видом излучения, так как способствуют образованию в п/п материалах одновременно ионизационных эффектов и эффектов смещения. Первые публикации, посвященные TCAD моделированию МОПТ структур, облученных протонами, выполнены с участием автора диссертации [16], [27], [28]. Работы сторонних авторов, отсутствуют.

К сожалению, стандартный набор физических моделей Synopsys Sentaurus TCAD не позволяет моделировать воздействие протонного или нейтронного излучения на МОПТ структуры. В работе Петросянц К.О. и Кожухов М.В. [29] была разработана физическая TCAD модель воздействия протонного и нейтронного излучения на биполярные транзисторы. В настоящей диссертации она адаптирована применительно к МОПТ структурам.

Д. Воздействие отдельных ядерных частиц.

Необходимо отметить, что достаточное количество работ отечественных и зарубежных авторов посвящены TCAD моделированию воздействия отдельных ядерных частиц (ОЯЧ) на радиационную стойкость МОП-структур [30]-[33]. Однако, это направление является предметом самостоятельного исследования, и автор настоящей диссертации не претендует на вклад в этот вид моделирования, за исключением материалов главы 2.3.

1.1.2 Температурные эффекты

При моделировании электротепловых режимов работы полупроводниковых приборов и элементов ИС/БИС, как правило, решаются две типовые задачи.

1. Температура – внешний параметр. Температура является независимым параметром, определяемым внешними условиями эксплуатации прибора. Задача имеет место для приборов, работающих при достаточно низких уровнях удельной рассеиваемой мощности, при которых не возникает внутреннего нагрева структуры прибора.

В универсальных коммерческих TCAD симуляторах для расчета п/п структур Sentaurus и ATLAS учет температурных эффектов осуществляется автоматически. Во-первых, температура входит в качестве независимого параметра во все фундаментальные уравнения, описывающие процессы переноса носителей заряда в п/п структурах, рекомбинации-генерации, накопления в объемных областях и на поверхностях раздела материалов с различными свойствами, а также другие физические механизмы. Кроме того, в TCAD симуляторах используется обширная библиотека температурных моделей для электрофизических параметров (μ , τ , ε , n_{ie} , ΔE_G и др.), входящих в фундаментальную систему уравнений (ФСУ) физики полупроводников.

Необходимо отметить, что все эти встроенные в TCAD программу температурные зависимости адекватно описывают физические процессы в п/п структуре прибора в стандартном температурном диапазоне $-60^\circ\text{C} \dots +150^\circ\text{C}$.

Проведенные нами и другими специалистами расчеты биполярных и МОП-транзисторов для высокотемпературных применений (high-T) показали, что встроенные в коммерческие TCAD симуляторы температурные модели в целом ряде случаев обеспечивают удовлетворительные результаты и для температур до $+300^\circ\text{C}$ и выше [34]-[39] для МОПТ структур с микронными и с субмикронными размерами, однако для глубоко субмикронных и нанометровых приборов встроенные в TCAD температурные модели в большинстве случаев не обеспечивают необходимой точности и нуждаются в корректировке и доработке.

В работе [34] с помощью Silvaco TCAD рассматриваются температурные эффекты (до 300°C) в МОП-структурах на объемном кремнии и кремний на изоляторе с длиной канала 1 мкм. Авторы используют стандартные физические модели для моделирования характеристик микронной структуры. Сделан вывод о важности учета температурных эффектов в МОПТ на объёмном кремнии и кремний на изоляторе. Однако сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными не представлено.

Среди отечественных специалистов вклад в приборно-технологическое моделирование высокотемпературных эффектов внесли: Ю. А. Чаплыгин, Т. Ю. Крупкина,

А. Ю. Красюков, Е. А. Артамонова, П. В. Игнатов, А. С. Бенедиктов, Е. С. Горнев, М. И. Черных, А. Н. Цоцорин, В. А. Кожевников и т.д.

В работе [36] исследуется влияние зависимости основных параметров субмикронного МОП-транзистора от температуры окружающей среды до 225°C. Авторы моделировали вольтамперные характеристики 0,5 мкм МОП-транзистора с различной дозой легирования области канала в диапазоне температур от -60°C до 225°C. Из результатов моделирования сделаны выводы о значительном влиянии эффекта саморазогрева на электрические характеристики транзисторов. Однако не указывается какие физические модели используются для моделирования, кроме того максимальная исследуемая температура не превышает 225°C.

В работах [37]-[38] исследуются характеристики субмикронных МОП-транзисторов, изготовленных по технологиям объемный кремний и кремний на изоляторе. Однако не указываются физические модели, используемые для моделирования, и максимальная исследуемая температура не превышает 250°C.

В работе М. И. Черных и др. [39] исследуется полевой транзистор с затвором Шоттки (ПТШ) на основе карбида кремния в диапазоне температур до 1000 К.

К сожалению, в коммерческих TCAD симуляторах, во-первых, отсутствуют адекватные модели для электрофизических параметров (μ , τ , S_0 , N_{it} , Q_{ot} и др.) в области низких температур (low-T). Во-вторых, в недостаточной степени учитывается эффект «вымораживания» подвижных носителей.

Имеющийся у нас и других специалистов опыт показал, что коммерческие TCAD симуляторы непригодны для расчетов приборов низкотемпературной электроники в диапазонах низких (-100°C...-200°C) и сверхнизких (до -269°C или 4 К) температур.

В последние годы наблюдается заметный прогресс в области производства и применения микросхем как для высокотемпературной, так для низкотемпературной криогенной техники, что, безусловно, будет стимулировать проведение работ в области создания TCAD-моделей физических процессов и электрофизических параметров для различных материалов и приборных структур в расширенном диапазоне температур от -269°C (4 К) до +300°C и выше [40]-[42].

2. Саморазогрев прибора. Температура внутри структуры прибора является функцией как внешней температуры окружающей среды, так и внутренней температуры, возникающей от джоулевого тепла, выделяемого прибором из-за высокого уровня

удельной рассеиваемой мощности. Эффект саморазогрева наблюдается, как правило, в силовых и СВЧ транзисторах и в транзисторах СБИС со сверхмалыми размерами.

В TCAD симуляторах эффект саморазогрева учитывается за счет подключения к ФСУ физики полупроводников уравнения теплопроводности:

$$\nabla(\lambda \nabla T) - H(j_n, j_p, \phi, T) = \rho C \frac{\delta T}{\delta t} \quad (1.3)$$

$$\nabla = \frac{\delta}{\delta x} \vec{i} + \frac{\delta}{\delta y} \vec{j} \quad (1.4)$$

где λ , C и ρ - теплопроводность, удельная теплоемкость и плотность полупроводникового материала зависящие от температуры T .

Температурные модели параметров λ , C и ρ присутствуют в библиотеках моделей коммерческих TCAD симуляторов.

Влияние эффекта саморазогрева на вольт-амперные характеристики и тепловой режим работы МОП-транзисторов различных типов БИС исследовано с помощью коммерческих TCAD программ в целом ряде публикаций, в частности [9], [34], [43], [44] и др. Однако, в работах [45]-[48] показано, что для транзисторов с глубоко субмикронными и нанометровыми размерами, используемые в стандартных версиях TCAD симуляторов, модели такого важного параметра, как теплопроводность кремния λ_{Si} и оксида кремния λ_{SiO_2} требуют существенной корректировки, поскольку не учитывают ряд важных эффектов, обусловленных сверхмалыми размерами.

В работе [9] исследовалось влияние граничных условий в виде внешних тепловых сопротивлений на выходных вольт-амперные характеристики планарного силового п-МОП-транзистора. Для учета зависимости максимальной температуры от размеров всего кристалла микросхемы, а также его топологии, длины металлических межсоединений, авторы дополнили модель МОП-транзистора двумя тепловыми сопротивлениями по бокам и одним к подложке.

В работе [34] с помощью Silvaco TCAD рассматриваются температурные эффекты (до 300°C) в МОП-структурах на объемном кремнии и кремний на изоляторе с длиной канала 1 мкм. На основе проведенных расчетов авторы делают выводы о важности учета температурных эффектов и сравнивают технологию на объёмном кремнии и кремний на изоляторе.

В работе [43] моделируются характеристики AlGaN/GaN HEMT с учетом эффекта саморазогрева. Исследовалось влияние размеров структуры и параметров тепловой модели на параметры и характеристики прибора.

В работе А. П. Рогова и В. О. Турина [44] затрагивается вопрос моделирования эффекта саморазогрева в МОП-транзисторе, изготовленного методом двойной диффузии. Однако целью работы является оценка влияния конструкции ДМОП на его параметры.

В работе [45] для 45 КНИ МОПТ приведено сравнение смоделированных и экспериментальных значений проводимости g_{ds} в диапазоне частот 10 кГц-100 ГГц. Показано, что не учет эффектов саморазогрева приводит к существенной погрешности расчетов на частотах 1 кГц-100 МГц. Параметры тепловой цепи R_{th} , C_{th} для SPICE модели BSIMCMG экстрагированы из результатов TCAD тепловых расчетов.

В работе [49] использовалась дрейф-диффузионная модель переноса носителей заряда с соответствующими коррекциями для подвижности, скорости насыщения и эффектов квантования. Учитывалась деградация подвижности, обусловленная наличием high-k затвора и нормальной компонентой электрического поля.

В работе [46] исследован эффект саморазогрева в нанометровой структуре. Отмечено, что теплопроводность тонкого слоя в нанометровой КНИ МОПТ структуре значительно отличается от теплопроводности в обычной структуре на объемном кремнии, поэтому используется TCAD модель с зависимостью коэффициента теплопроводности кремния от толщины активного слоя канала транзистора [47]. Результаты двух видов моделирования: с помощью модифицированной TCAD модели и молекулярно-динамической модели, показали, что необходимо учитывать данный аспект в дальнейших расчетах.

В работе [48] авторы рассматривают эффект саморазогрева в 7 нм FinFET 3D структуре. Исследуется влияние теплового сопротивления и путей теплоотвода на значение максимальной температуры и расположение наиболее нагретых областей в структуре. Так же авторы затрагивают тему влияния межсоединений на максимальную температуру отдельного устройства.

1.1.3 Совместное влияние радиации и температуры облучения

Публикации по тематике совместного учета ионизирующих эффектов и температуры облучения в МОП-структурах ограничиваются трудами Oldham T.R, Зебрева Г.И., Fleetwood D.M., Першенков В.С., Hughart D.R., Browning J.S. и др. [50]-[55]. Показано, что радиационный сдвиг порогового напряжения в значительной степени зависит от со-

стояния ловушечных уровней в материале оксида, концентрация, которых сильно зависит от температуры, при которой происходит облучение или отжиг. TCAD модель этого эффекта разработана автором диссертации [56].

Ряд работ посвящено исследованию деградации параметров и характеристик ячеек памяти после воздействия тяжелой заряженной частицы при различных температурах. В работе [32] с помощью симулятора ATLAS проведено моделирование зависимости порогового значения линейных потерь энергии (LET_{th}) при ударе заряженной частицы в 0,18 мкм МОП-транзистор при различных температурах. Показано, что зависимость имеет вид параболы. В работе [57] авторы наблюдают, что увеличении температуры до 125°C заметно влияет на величину сечения захвата и порогового значения линейных потерь энергии.

1.1.4 Обзор современного состояния исследований в области приборно-технологического моделирования конструкции и технологии МОПТ структур

TCAD модели перспективных конфигурации МОП-транзисторов с различным профилем легирования канала и формой скрытого оксида.

Уменьшение рабочих областей МОПТ в область субмикронных и нанометровых размеров неизбежно приводит к уменьшению пробивных напряжений и повышению токов утечки. Это стимулировало разработчиков МОПТ к поиску вариантов структур, наименее подверженных указанной выше тенденции.

В настоящей работе средствами TCAD исследовались электрические характеристики следующих разновидностей КНИ МОПТ структур:

1. структуры с неравномерным легированием канала;
2. структуры с L-образным скрытым оксидом (Quasi-SOI или L-type SOI);
3. структуры с частичным скрытым оксидом (partial SOI);
4. структуры с high-k диэлектриком.

Исследованию МОПТ структур с неравномерным легированием канала средствами TCAD посвящен целый ряд работ.

В работе [58] показано, что в асимметричной КНИ МОПТ структуре можно повысить на 15-20% пробивное напряжение стокового рп-перехода по сравнению с симмет-

ричной структурой при незначительном ухудшении других основных параметров МОПТ.

В работах [59], [60] исследовались 0,1 мкм и 0,35 мкм структуры n-МОПТ с асимметричным легированием канала со стороны истока. Оценивались основные параметры транзистора $I_{нас}$, $I_{утеч}$, g_m , $V_{пор}$ в зависимости от параметров асимметричного легирования. Показано, что возможно улучшение ряда статических параметров при оптимальном выборе параметров легирования.

В работах [61], [62] представляется новая конструкция МОП-транзистора с областью собственной проводимости со стороны стока (graded-легирование). Авторы исследуют и проводят сравнение характеристик такой структуры с традиционной конструкцией, в том числе и при сверхнизких температурах до 4,16 К. Показано, что структура с областью собственной проводимости со стороны стока приводит к уменьшению действия паразитного биполярного транзистора и увеличению напряжения пробоя.

В работе [63] исследуется двухзатворный нанометровый МОПТ с graded-легированием. Авторы делают заключение, что такой профиль легирования повышает эффективность переноса носителей, что позволяет уменьшить ток утечки и улучшить соотношения тока насыщения к току утечки.

В работе [64] исследовались 45 нм и 32 нм КНИ МОПТ с одно- и двухсторонним halo легированием под областями истока и стока. Показано, что при соответствующем подборе параметров легирования: в 45 нм приборе интегральный показатель мощности задержки может быть уменьшен на 15%, а собственно задержка на 11%; в 32 нм приборе ток стока $I_{нас}$ может быть увеличен на 7%, а задержка уменьшена на 10%, при незначительном ухудшении статических параметров в обоих случаях.

В работе [65] исследовался 45 нм КНИ МОПТ с одно- и двухсторонним halo легированием под областями истока и стока. Показано, что эффективный ток стока в структуре с асимметричным легированием на 10% больше вследствие увеличения инжекции со стороны истока и снижения потенциального барьера со стороны стока. Так же рассмотрено изменение времени переключения КМОП ячейки на основе исследуемых транзисторов. Показано уменьшение времени переключения на 5% вследствие увеличения скорости и носителей и уменьшения емкости стокового перехода.

В работе [66] с помощью TCAD было проведена оптимизация профиля легирования канала паразитного «донного» транзистора. Таким образом, увеличив стойкость структуры к накопленной дозе радиации.

В работе [67] с помощью TCAD исследовались тепловые эффекты в структурах планарных мощных КНИ МОПТ с неравномерным легированием канала. Показано, что эффекты, связанные с саморазогревом структуры, намного сильнее ограничивают рабочие напряжения и токи, чем эффекты, связанные с включением паразитного биполярного транзистора.

TCAD модель нанометрового МОП-транзистора с high-k диэлектриком.

В работе Chander S. и др. [68] с помощью Sentaurus TCAD исследованы изменения параметров МОП-структуры в зависимости от материала подзатворного диэлектрика (SiO_2 , Si_3N_4 , HfO_2).

В работе Rana A. K. и др. [69] с помощью Sentaurus TCAD исследовано влияние конструкции подзатворного диэлектрика HfO_2 на основные параметры МОП-структуры.

В работе Yadav S. и др. [70] с помощью Silvaco TCAD исследована структура двухзатворного МОП-транзистора с двумя типами диэлектрика (SiO_2 и HfO_2).

В работе Shashank N. и др. [71] с помощью Silvaco TCAD рассмотрено влияние заряда на границе $\text{HfO}_2/\text{PolySi}$ на характеристики МОП-транзистора.

Однако, во всех вышеперечисленных работах не указывается, какие именно модели физических эффектов используются при расчетах МОП-структур с high-k диэлектриком.

Количество работ, посвященных TCAD моделированию радиационных эффектов в таких структурах ограничивается публикациями [72] и [73].

Коллективом специалистов компании IBM и университетов Georgia Institute of Technology и Vanderbilt University разработана 2D Synopsys TCAD модель high-k КНИ КМОП приборов, настроенные на 65 нм, 45 нм и 32 нм технологические нормы [72]. Используется гидродинамическая модель переноса носителей, учитываются зависимости подвижности от степени легирования и электрического поля и эффект лавинного умножения носителей в сильных полях. Модель использована для оценки влияния дозовых эффектов, обусловленных действием X-лучей в диапазоне 0,1-1,0 Мрад. Отдельно исследовалось влияние концентрации дефектов на границах STI/Si и BOX/Si. Значения концентрации дефектов задавались в программе методом простого перебора.

В диссертационной работе Rezzak N. [73] проведено моделирование наноразмерного МОП-транзистора с high-k диэлектриком. Однако, замена традиционного SiO₂ подзатворного диэлектрика на HfO₂ связана с определенными сложностями.

В обеих работах ([72] и [73]) отсутствует какая-либо информация о физических TCAD моделях, используемых для учета воздействия радиации на структуру с high-k диэлектриком.

1.2 Методологические аспекты TCAD моделирования МОПТ структур с учетом влияния радиации и температуры

1.2.1 Подсистема TCAD RAD-THERM моделирования МОПТ структур

На основе критического анализа, приведенного в главе 1.1, сделан вывод, что использование коммерческих версий TCAD симуляторов не удовлетворяет в полной мере требованиям дизайнеров и разработчиков современных МОПТ структур, предназначенных для работы в условиях действия различных видов радиации и сверхвысоких и сверхнизких температур.

Основными причинами, определяющими данную ситуацию, являются:

1. «слабая» библиотека радиационных и температурных моделей электрофизических параметров, материалов и приборных структур;
2. чрезмерные временные затраты при расчете 3-х мерных приборных структур; отсутствие экономичных инженерных подходов, корректно упрощающих задачу и снижающих время счета;
3. наличие целого ряда перспективных с точки зрения радиационной и температурной стойкости МОПТ КНИ структур, для которых TCAD моделирование вообще не выполнялось ранее или было выполнено поверхностно, в первом приближении.

Исходя из вышеизложенного, в диссертации разработана расширенная библиотека TCAD моделей электрофизических параметров полупроводниковых структур, в полной мере учитывающая радиационные и температурные эффекты субмикронных, глубоко субмикронных и наноразмерных МОПТ структур.

Основные этапы моделирования МОПТ структур с помощью расширенной RAD-THERM библиотеки электрофизических параметров в среде TCAD Sentaurus Synopsys приведены на Рис. 1.1.

Ядром подсистемы RAD-THERM моделирования является стандартная версия TCAD симулятора Sentaurus Synopsys. Библиотека моделей электрофизических параметров п/п материалов и приборных структур существенным образом расширена за счет включения в нее двух групп радиационных и температурных моделей, учитывающих специфику современных глубоко субмикронных и нанометровых МОПТ структур.

Процедура RAD-THERM моделирования п/п приборов выполняется в следующей последовательности:

1. Описание конструкции МОПТ структуры в стандартной среде TCAD; задание вида и параметров радиационного и/или теплового воздействия; описание задания на расчет набора выходных электрических параметров.
2. Обращение к общему контроллеру, который выполняет две основные функции:
 - по заданию п.1 выбирает из библиотек необходимые виды моделей для расчета в среде TCAD;
 - преобразует параметры п.1, описывающие воздействие радиации и/или температуры, к виду, который используется в физических моделях этих воздействий.
3. Расчет в среде TCAD набора выходных электрических характеристик и параметров в заданных диапазонах конкретного вида радиации и температуры.
4. Определение степени деградации параметров п/п прибора и/или фиксация сбоев при работе в критических режимах, определяемых внешними воздействиями. Оценка радиационной и температурной стойкости прибора.
5. Принятие решения о пригодности выбранного конструктивно-технологического решения МОПТ или о необходимости его замены в п.1.

Ключевую роль в описанной процедуре играют новые радиационные и температурные модели электрических параметров, дополнительно включенные в стандартную TCAD библиотеку моделей (на Рис. 1.1 они окружены пунктиром).

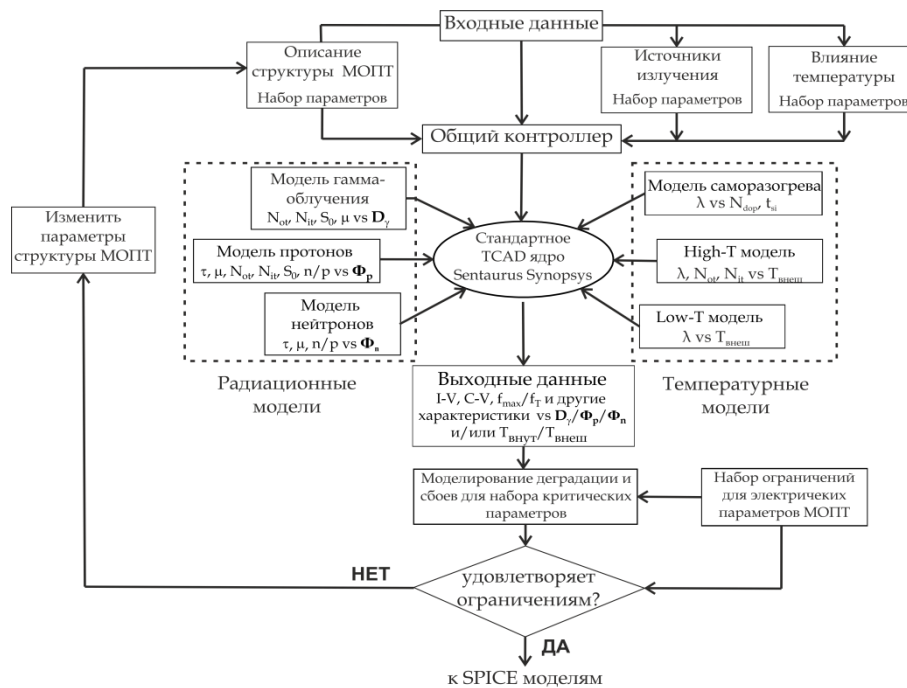


Рис. 1.1. Структура подсистемы TCAD RAD-THERM моделирования КНИ МОПТ с учетом воздействия радиационных и температурных эффектов

1.2.2 Радиационные модели

Набор новых радиационных моделей электрофизических параметров п/п материалов и приборных структур, реализованный в среде TCAD Sentaurus Synopsys, приведен на рисунке 1.2. Подробно, как сами модели, так и результаты расчетов с их помощью МОПТ структур, изготовленных по различным технологиям, рассмотрены в главах 2, 4, 5 и 6.

Здесь лишь кратко отметим внесенные нами элементы новизны по сравнению с радиационными моделями в стандартной коммерческой версии TCAD:

1. в библиотеку физических моделей впервые встроена модель нейтронного воздействия, включающая учет зависимости времени жизни τ_n , τ_p носителей заряда от флюенса нейтронов, уровня легирования п/п структуры и эффективности инжекции носителей. Кроме того, использована улучшенная формула для описания зависимости эффективной подвижности от величины флюенса нейтронов $\mu_{\text{eff}}(\Phi_n)$;
2. существенно улучшены физические модели, учитывающие воздействие гамма излучения:

- введена более точная зависимость подвижности от дозы облучения $\mu_{\text{eff}}(D_\gamma)$;
 - введена зависимость скорости поверхностной рекомбинации от дозы $S(D_\gamma)$ на границах Si/SiO₂ приборной структуры;
 - введены аналитические аппроксимации для концентрации поверхностных и объемных дефектов $N_{\text{it}}(D_\gamma)$, $N_{\text{ot}}(D_\gamma)$ на поверхностях раздела Si/SiO₂, Si/HfO₂ и в слоях диэлектриков затворва, BOX и STI/DTI изоляции, построенные на основании достоверных физических экспериментов для глубоко субмикронных и нанометровых приборных структур;
3. впервые введена модель, учитывающая воздействие протонов на электрофизические параметры п/п материала и приборной структуры. Модель построена на аддитивном подходе, объединяющем влияние механизмов смещения и ионизации, вклад которых рассчитывается по частным моделям для нейтронов и гамма-лучей. Значения флюенса нейтронов Φ_n и дозы гамма-излучения, эквивалентные воздействию флюенса протонов Φ_p , рассчитываются в специально разработанном программном блоке.

Предложенные в диссертации радиационные модели были доложены и прошли обсуждение со специалистами на серьезных профильных отечественных и зарубежных конференциях [20], [22], [28], [74]-[84] и опубликованы в [16]-[19], [21], [27].

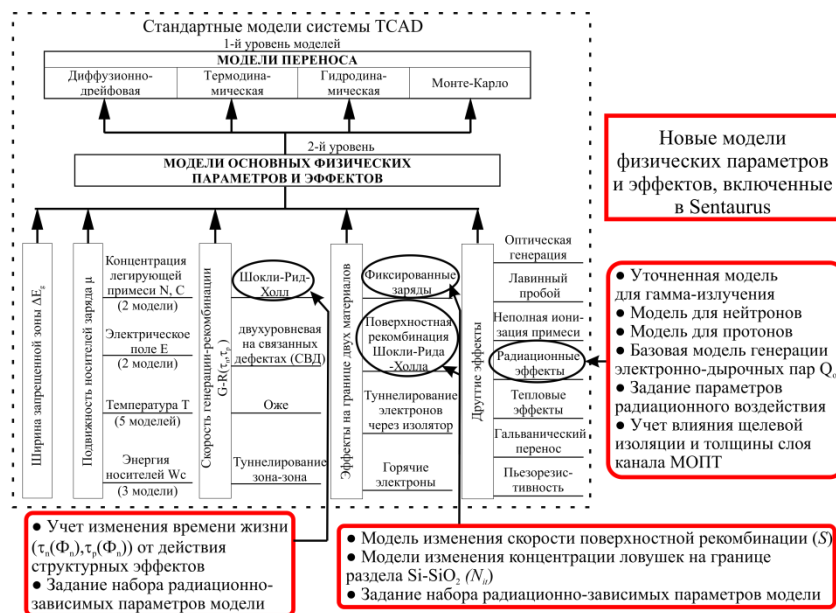


Рис. 1.2. Новые радиационные модели, встроенные в Synopsys TCAD, учитывающие нейтронное, протонное и гамма облучение

1.2.3 Температурные модели

В библиотеку физических моделей добавлены две группы моделей, позволяющих расширить возможности стандартной коммерческой версии симулятора Sentaurus Synopsys (рисунок 1.3):

- высокотемпературные модели теплофизических параметров п/п материалов, учитывающие специфику глубоко субмикронных и нанометровых приборных структур;
- низкотемпературные модели теплофизических параметров для диапазона криогенных температур (до -250°C).

Подробно, как сами модели, так и результаты расчетов с их помощью МОПТ структур, изготовленных по различным технологиям, рассмотрены в главах 3, 4, 5 и 6.

Здесь лишь кратко перечислены внесенные нами улучшения по сравнению с моделями, используемыми в стандартных коммерческих версиях TCAD симуляторов:

- 1) новые более точные высокотемпературные зависимости коэффициента теплопроводности $\lambda_{\text{Si}}(T)$, λ_{SiO_2} и подвижности $\mu_{\text{эфф}}(T)$ от температуры, степени легирования полупроводниковых областей и толщины активного слоя канала транзистора (для тонких и ультратонких слоев);
- 2) точные температурные зависимости плотности дефектов на границах Si/SiO₂ $N_{\text{it}}(T)$ и в объемах диэлектриков $N_{\text{ot}}(T)$, полученные на основе достоверных экспериментальных теплофизических исследований последнего времени [85];
- 3) низкотемпературные (до $-250^{\circ}\text{C}/23\text{ K}$) зависимости теплопроводности кремния, легированного атомами бора и фосфора, учитывающие величину концентрации легирующей примеси. Это нововведения позволило распространить возможности TCAD симулятора на расчет МОПТ структур в криогенной области температур. Ранее такие возможности отсутствовали.

Предложенные в диссертации температурные модели были доложены и прошли обсуждение со специалистами на серьезных профильных отечественных и зарубежных конференциях [20], [75], [77], [79], [84], [86]-[91], и опубликованы в [56], [92], [93].



Рис. 1.3. Новые температурные модели, встроенные в Synopsys TCAD, учитывающие нейтронное, протонное и гамма облучение

1.2.4 Упрощенная модель 3D МОПТ структуры для TCAD RAD-THERM моделирования. Квази-3D подход

Полностью трехмерный (fully-3D) расчет МОПТ структур всегда являлся «узким местом» TCAD моделирования, во-первых, из-за высокой трудоемкости и сложности подготовки 3D структуры прибора к расчету и обработки полученных результатов и, во-вторых, из-за больших затрат процессорного времени на расчет по 3D-численной модели. Ситуация резко усложняется при необходимости учета радиационных и температурных эффектов, так как полный цикл вычислений необходимо проводить многократно для набора различных температур и интенсивностей радиационного воздействия. В этой связи, разработка упрощенных TCAD моделей приборных структур, резко снижающих время счета и обеспечивающих приемлемую для практических применений точность расчетов, является чрезвычайно актуальной задачей [94], [95].

Типовой, наиболее часто встречающейся в практике приборного проектирования, и требующей обязательного 3D TCAD моделирования, является задача расчета радиационно- или температурно-индуцированных токов утечки современных МОП КНИ структур и их вольтамперных характеристик.

Для решения этой задачи в диссертации предложен эффективный квази-трехмерный (Quasi-3D) подход, учитывающий специфику конструкции МОПТ КНИ структур. Общая модель конструкции 3D МОПТ разбивается на три подмодели: основ-

ного 2D транзистора с тонким верхним затвором T_{TOP} ; паразитного 2D транзистора с толстым нижним затвором T_{BOX} ; паразитного 3D бокового транзистора T_{STI} . Транзисторы T_{TOP} и T_{BOX} рассматриваются в привычной 2D плоскости XY поперечного разреза МОПТ структуры.

Паразитный 3D боковой транзистора T_{STI} имеет поликремневый затвор, толстый подзатворный окисел t_{STI} , тонкий слой кремния ΔZ_{SIDE} , в котором локализуется радиационно-индуцированный заряд подвижных носителей (рисунок 1.4), а также фиктивные контакты стока, истока, подложки и кармана. В такой приборной структуре токи бокового паразитного транзистора вычисляются на контактах в программе Sentaurus для любых приложенных напряжений и доз внешнего ионизирующего излучения.

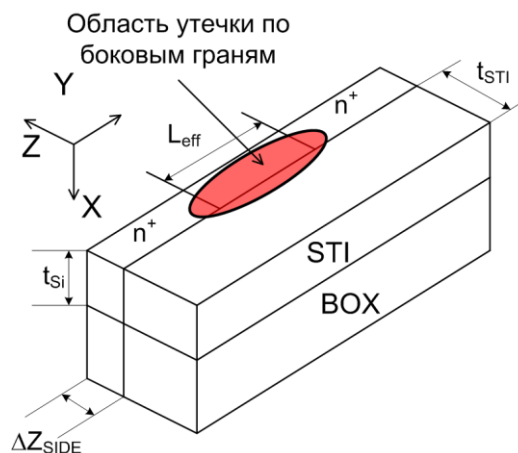


Рис. 1.4. Изображение «сверхзкого» паразитного бокового МОП-транзистора

Вместо затратной по времени счета fully-3D задачи она сводится к решению двух гораздо менее сложных и менее затратных 2D классических частных задач для T_{TOP} , T_{BOX} и упрощенной 3D задачи для «сверхзкого» паразитного транзистора T_{STI} . Полученные в результате решения частных задач компоненты тока стока суммируются для получения общего тока утечки (тока стока МОПТ КНИ структуры):

$$I_{leak} = I_{TOP} + I_{BOX} + 2 \cdot I_{STI} \quad (1.5)$$

Результаты TCAD моделирования типовой МОПТ КНИ структуры с субмикронными размерами показали, что полное 3D моделирование (порядка 165 тысяч элементов разностной сетки) одной ветви сток-затворной характеристики потребовало 11 часов на ЭВМ с четырехъядерным процессором Intel i7 с частотой 3400 МГц и оперативной памятью 16 Гбайт; квази 3D моделирование (порядка 4 тысяч элементов разностной сетки) потребовало 71 минуту, то есть в 9 раз меньше. Разница в значениях ВАХ составила не более 10%.

Предложенный в диссертации квази-трехмерный подход к расчету радиационно-, температурно-индуцированных токов в МОПТ КНИ структурах был доложен и обсужден со специалистами на профильных конференциях [96] и опубликован в [19].

1.3 Оценка радиационной и температурной стойкости перспективных конструктивно-технологических разновидностей субмикронных МОП КНИ структур

Для разработанной в настоящей диссертации расширенной библиотеки TCAD RAD-THERM моделей МОПТ структур (рисунки 1.1 и 1.2) проведена процедура верификации моделей. Настройка и верификация моделей осуществлялась по электрическим характеристикам реальных МОПТ, измеренных в заданных диапазонах радиационных воздействий и рабочих температур. Эксперимент был предоставлен отечественными производителями; кроме того, использовались опубликованные экспериментальные данные зарубежных производителей. Результаты верификации TCAD RAD-THERM моделей для конкретных типов МОПТ КНИ подробно рассмотрены в главах 2-4 диссертации.

Верифицированные TCAD RAD-THERM модели были использованы для решения 2-х задач:

1. для проектирования электронной базы радиационно-и/или температурно-стойких цифровых и аналоговых КМОП КНИ ИС и БИС с микронными, субмикронными и глубокосубмикронными размерами, разрабатываемых на отечественных предприятиях (подробно результаты представлены в главе 6);
2. оценки радиационной и температурной стойкости перспективных конструктивно-технологических разновидностей глубоко субмикронных и нанометровых МОПТ КНИ структур.

Для целого ряда структур МОПТ КНИ подобные оценки были выполнены впервые. Они вынесены на защиту в качестве одного из научных результатов диссертации.

Ниже приведен перечень исследованных МОПТ КНИ структур, перспективных с точки зрения радиационной и температурной стойкости.

Существует целый ряд известных конструктивно-технологических решений МОПТ КНИ структур, применение которых в составе КМОП КНИ БИС повышает их

радиационную и температурную стойкость. В первую очередь, это решения, связанные с особой конфигурацией затворного узла МОПТ КНИ: ELT- (enclosed layout transistor) [97]; приборы с H- [98]; I- [99], Z- [14] топологией затвора, DGA – dummy gate assisted layout [15]. Все они реализованы в рамках стандартной КНИ технологии и в достаточной степени исследованы как экспериментально, так и с помощью TCAD моделирования.

Однако, помимо вышеперечисленных, существует целый ряд перспективных конструктивно-технологических решений МОПТ КНИ, повышающих радиационную и температурную стойкость, таких как:

1. с подзатворным high-k оксидом на основе HfO_2 .
2. с неравномерным легированием области канала.
3. с нестандартной конфигурацией области скрытого оксида SiO_2 .
4. с областью скрытого оксида на основе материалов с высоким коэффициентом теплопроводности.
5. на изолирующей подложке кремний на сапфире (КНС).

Проведенный нами анализ имеющихся публикаций показал, что реальные возможности этих структур исследованы недостаточно, или практически не исследованы. Работы в основном носят экспериментальный характер, причем объем экспериментальных данных во многих случаях ограничен из-за трудоемкости радиационных и температурных измерений.

В настоящей диссертации проблему в значительной степени удалось решить с помощью TCAD моделирования. Нами были построены TCAD RAD и THERM модели всех перечисленных выше разновидностей МОПТ КНИ структур. С помощью этих моделей выполнена оценка их радиационной и температурной стойкости. Подробно результаты изложены в главе 4. Перечень исследованных МОПТ КНИ структур приведен ниже.

1. Нанометровые МОПТ структуры с подзатворным high-k оксидом на основе HfO_2 (приведены в таблице 1.1).

Таблица 1.1. Публикации по TCAD моделированию нанометровых МОПТ структур с подзатворным high-k оксидом на основе HfO₂.

№	Тип МОПТ структуры	Публикации по TCAD моделированию с учетом	
		радиации	температуры
1	45 нм МОПТ с high-k подзатворным оксидом HfO ₂	[72], [73]	–
2	45 нм МОПТ с подзатворным оксидом в виде стека HfO ₂ /SiO ₂	[73]	–

TCAD RAD-THERM модель нанометрового МОПТ КНИ с high-k диэлектриком затвора на основе HfO₂ выносится на защиту как один из основных научных результатов диссертации.

Материал по проблеме моделирования 45 нм МОПТ КНИ с HfO₂ диэлектриком затвора был доложен на конференциях [22], [76], [82], [83], [100]-[102] и опубликован в работах [21], [103], [104].

2. Субмикронные МОПТ структуры с неравномерным легированием канала (приведены в Таблице 1.2).

Таблица 1.2. Публикации по TCAD моделированию субмикронных МОПТ структур с неравномерным легированием канала.

№	Тип МОПТ структуры	Публикации по TCAD моделированию с учетом	
		радиации	температуры
1	с асимметричным легированием канала	–	[67]
2	с областью собственной проводимости в канале со стороны стока/истока	–	–

Для МОПТ структур этого вида результаты моделирования переходных процессов и времен переключения транзисторов, а также учет влияния ионизирующего излучения на ВАХ, выполнены автором диссертации впервые и аналогов не имеют.

Материал по моделированию МОП КНИ структур с неравномерным легированием канала был доложен на конференциях [105]-[106].

3. Субмикронные МОПТ КНИ структуры с различной конфигурацией скрытого оксида SiO₂ (приведены в таблице 1.3).

Таблица 1.3. Публикации по TCAD моделированию субмикронных МОПТ КНИ структур с различной конфигурацией скрытого оксида SiO₂.

№	Тип КНИ МОПТ структуры L=100 нм, t _{gateox} = 2 нм	T _{макс} [†] , К	Публикации по TCAD моделированию с учетом	
			радиации	температуры
1	SELBOX – с «окном» в скрытом оксиде	320	–	[107], [108]
2	Partial SOI – со скрытым оксидом, перекрывающим только половину МОПТ структуры	320	–	–
3	Quasi SOI – с L-образными слоями скрытого оксида под стоком и истоком	318	[109]	[110]
4	UTB (Ultra-Thin BOX), t _{BOX} = 10 нм	325	–	[110]
5	UTBV (Ultra-Thin BOX and Body), t _{BOX} = 6 нм, t _{ch} = 25 нм	309	–	[111]
6	Double SOI – со слоем кремния, встроенным в скрытый оксид	342	[112]	–

Для сравнения с данными таблицы 1.3, максимальная температура МОПТ на объемном кремнии 316 К, максимальная температура МОПТ КНИ структуры 348 К.

Показано, что из исследованных структур наилучшим кандидатами на использование в радиационно- и температурно-стойких КМОП КНИ СБИС являются глубоко субмикронные и нанометровые структуры UTB и UTBV. Однако, следует отметить, что

[†] Для приведенных в таблице 1.3 МОПТ КНИ структур впервые получены оценки по максимальной температуре «саморазогрева» структуры прибора (T_{макс}) и стойкости к воздействию поглощенной дозы радиационного воздействия.

технологический процесс их изготовления несколько отличается от стандартного КМОП КНИ процесса.

Материал по моделированию МОПТ КНИ структур с различной конфигурацией скрытого оксида SiO_2 был доложен на конференциях [75], [79], [87], [113] и опубликован в [92], [93].

4. Субмикронные МОПТ КНИ структуры со скрытым оксидом на основе материалов с высоким коэффициентом теплопроводности (приведены в таблице 1.4).

Таблица 1.4. Публикации по TCAD моделированию субмикронных МОПТ КНИ структур со скрытым оксидом на основе материалов с высоким коэффициентом теплопроводности.

№	Материал скрытого оксида КНИ МОПТ структуры $L=100$ нм, $t_{\text{gateox}} = 2$ нм	Теплопроводность, Вт/м·К	$T_{\text{макс}}$, К	Публикации по TCAD моделированию с учетом	
				радиации	температуры
1	Al_2O_3 (alumina) – оксид алюминия	20	320	–	–
2	AlN – нитрид алюминия	136	317	–	[114]
3	Si_3N_4 – нитрид кремния	30	320	–	–
4	SiO_2 оксид кремния, окруженный «поясом» AlN	140/136	325	–	[115]

Для приведенных в таблице 1.4 КНИ МОПТ структур впервые получены оценки максимальной температуры «саморазогрева» ($T_{\text{макс}}$) в режиме максимальной потребляемой мощности. Показано, что применение «скрытых» оксидов с высокой проводимостью позволяет снизить $T_{\text{макс}}$ в активной зоне канала транзистора на 25-31 К по сравнению со стандартной КНИ МОПТ структурой, для которой $T_{\text{макс}} = 348$ К (75°C). Наилучший отвод тепла достигается в транзисторной структуре со скрытым оксидом на основе нитрида алюминия AlN : $T_{\text{макс}} = 317$ К (для сравнения, в структуре МОПТ на объемном кремнии с $\lambda_{\text{Si}} = 140$ Вт/м·К максимальная температура равна 316 К).

Результаты по моделированию КНИ МОПТ структур со скрытым оксидом на основе материалов с высоким коэффициентом теплопроводности были доложены на конференциях [75], [87], [113] и опубликованы в [92], [93].

5. Субмикронные КНС (кремний на сапфире) МОП-структуры (приведены в таблице 1.5).

Таблица 1.5. Публикации по субмикронным КНС МОП-структурам.

№	Тип КНС МОП-структуры	Публикации по TCAD моделированию с учетом	
		радиации	температуры
1	0,75 мкм с $t_{Si}=0,3$ мкм	–	–
2	с областью собственной проводимости в канале ($t_{Si}=0,3$ мкм)	–	–
3	0,25 мкм UTSi Peregrine	[116], [117]	–
4	0,8 мкм КНС МОПТ	[118]	–

Для всех перечисленных разновидностей МОПТ КНС структур расчет статических ВАХ и переходных процессов в условиях воздействия радиации и температуры выполнен автором диссертации впервые.

Показано, что введение в канал транзистора области собственной проводимости уменьшает время переключения транзистора на 12-20%. Это позволило, в частности, сформулировать важную для UTSi КНС (кремний на сапфире) технологии рекомендацию: 0,75 мкм МОПТ КНС с областью собственной проводимости со стороны истока («вставка» в канале) по быстродействию эквивалентен 0,5 мкм МОПТ КНС транзистору с обычным каналом.

Материал по моделированию КНС МОП-структур был доложен на конференциях [119]-[120] и опубликован в [121].

1.4 Выводы по главе 1

На основе критического анализа, приведенного в главе 1, сделан вывод, что использование коммерческих версий TCAD симуляторов не удовлетворяет в полной мере требованиям дизайнеров и разработчиков современных МОПТ структур, предназначенных для работы в условиях действия различных видов радиации и сверхвысоких и сверхнизких температур.

Основными причинами, определяющими данную ситуацию, являются:

1. «Слабая» библиотека радиационных и температурных моделей электрофизических параметров, материалов и приборных структур;
2. Чрезмерные временные затраты при расчете 3-х мерных приборных структур; отсутствие экономичных инженерных подходов, корректно упрощающих задачу и снижающих время счета;
3. Наличие целого ряда перспективных с точки зрения радиационной и температурной стойкости МОПТ КНИ структур, для которых TCAD моделирование вообще не выполнялось ранее или было выполнено поверхностно, в первом приближении.

Исходя из вышеизложенного, в диссертации разработана расширенная библиотека TCAD моделей электрофизических параметров полупроводниковых структур, в полной мере учитывающая радиационные и температурные эффекты субмикронных, глубоко субмикронных и наноразмерных МОПТ структур.

Глава 2 TCAD-модель субмикронных и глубоко субмикронных МОПТ структур, учитывающая радиационные эффекты обусловленные воздействием гамма лучей, нейтронов и протонов

2.1 Учет влияния нейтронного и протонного излучения в МОП-структурах

В главе разрабатывается TCAD модель учета протонного и нейтронного облучения для МОП-транзисторных структур субмикронного размера.

Нейтроны взаимодействуют с веществом тремя способами: упругое и неупругое столкновение с атомами решетки, и через процесс поглощение частицы ядром вещества. Для высокоэнергетических нейтронов преобладает упругое рассеяние, для низкоэнергетических – процесс поглощения [122].

Процесс упругого рассеяния приводит к образованию разупорядоченных областей. При столкновении атому передается энергия, которая может быть достаточна для смещения атома относительно исходного положения и образования дефекта типа «вакансия». В свою очередь удаленный атом может столкнуться с другим атомом решетки и выбить его, что приводит к каскадному процессу. В результате образуются локальные области, состоящие из большого числа дефектов типа «вакансия». Наличие примеси или легированных атомов вне образовавшегося дивакансного ядра при взаимодействии с выбитыми атомами способствуют образованию постоянных дефектов, которые представляют собой центры рекомбинации и захвата заряда [123]. Таким образом, разупорядоченная область представлять собой дивакансное ядро, окруженное различными дефектами. В целом такие области действуют как центры рекомбинации и захвата заряда для неосновных носителей и, следовательно, уменьшают их время жизни.

Таким образом, наличие разупорядоченных областей приводит к следующим изменениям в полупроводнике: уменьшение концентрации основных носителей заряда, деградация подвижности свободных носителей заряда и уменьшение времени жизни неосновных носителей заряда [124], [125].

Принцип работы МОП-транзистора базируется на переносе основных носителей заряда, поэтому уменьшение времени жизни неосновных носителей заряда значительно не повлияет на функциональность прибора. Однако, после взаимодействия нейтронов с атомами вещества могут образоваться вторичные ионизированные частицы, которые могут вызывать нарушение функциональности прибора. К примеру, вторичные нейтроны являются причиной одиночных сбоев в электронике летальных аппаратов летающих на высотах более 10 км [126].

В космическом пространстве помимо воздействия ионизирующего излучения важным фактором, влияющим на функциональность МОП-транзисторов, является протонное облучение. Как известно протонное облучение вызывает два вида дефектов: ионизационные и структурные.

В экспериментах, как правило, воздействие протонного излучения заменяется совокупным воздействием нейтронного и гамма-излучения. При этом нейтронное излучение используется для образования эффектов смещения [127], а гамма-излучение используется для создания ионизационных эффектов [128], [129].

Воздействие гамма-облучения на МОП-транзисторы, вызывает деградацию порогового напряжения, подпорогового наклона и тока утечки. Эти эффекты в основном связаны с созданием электрон-дырочных пар и захватом носителей заряда в слое оксида и на границе раздела SiO_2/Si .

Ионизационная составляющая моделируется с использованием встроенной в Synopsys TCAD радиационной модели для стационарной дозы облучения, которая была модифицирована для учета захвата заряда на границе раздела SiO_2/Si и учета деградации подвижности от воздействия стационарной дозы облучения [16].

Структурные дефекты от нейтронной составляющей, приводит к изменению подвижности, времени жизни неосновных носителей заряда, концентрации неравновесных носителей заряда и темпа рекомбинации, а также концентрация ловушечных уровней в оксиде и на границе раздела SiO_2/Si .

Однако в Synopsys TCAD отсутствует радиационная модель учета влияния протонного излучения. Ряд работ [23], [130] посвящено воздействию протонного излучения на МОП-транзисторные структуры, однако приборно-технологического моделирования такого воздействия широко не рассматривалось. Приборно-технологическое моделиро-

вание протонного облучения возможно путем представления его как суммарного воздействия двух факторов: гамма-облучения и нейтронного облучения.

Стандартная радиационная модель Synopsys TCAD не учитывает изменение времени жизни неосновных носителей заряда, концентрации неравновесных носителей заряда и темпе рекомбинации. Рассмотрим эти параметры подробнее.

Концентрация неравновесных носителей заряда. Изменение концентрации неравновесных носителей заряда в современных МОП-транзисторах незначительно и может не учитываться [131].

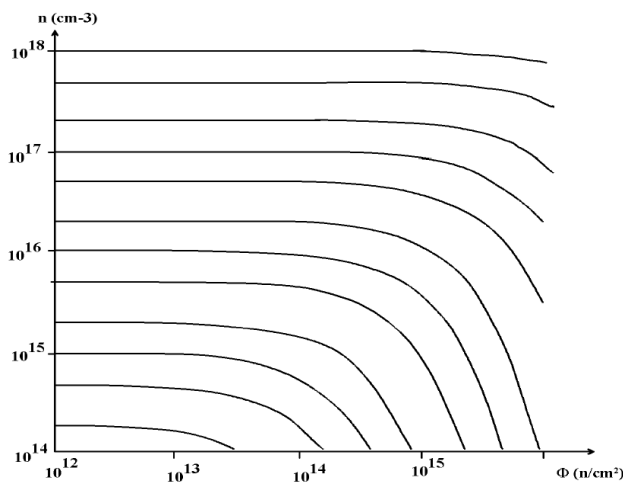


Рис. 2.5. Зависимость концентрации носителей заряда от интегрального потока нейтронов [131]

Из рисунка 2.5 видно, что для уровней легирования современных элементов БИС заметный спад концентрации носителей наступает при достаточно больших уровнях флюенса нейтронов, когда другие электрофизические параметры уже сильно деградировали. Эффект спада концентрации носителей на рисунке 2.5 следует учитывать в приборах с очень низким уровнем легирования (например, в силовых приборах).

Время жизни. Деградация времени жизни носителей заряда описывается следующим уравнением:

$$\frac{1}{\tau_{\Phi}} = \frac{1}{\tau_0} + \Phi_n K_{\tau}, \quad (2.6)$$

где: τ_{Φ} – время жизни после облучения, τ_0 – время жизни до облучения, Φ_n – флюенс нейтронов, K_{τ} – коэффициент радиационного изменения времени жизни.

В большинстве работ K_{τ} определяется из полуэмпирических выражений Грегори [132]. Однако, в данной модели отсутствует зависимость K_{τ} от концентрации легирующей примеси, что важно для современных МОП-транзисторов, у которых легирование

области канала может доходить до $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Поэтому была использована модифицированная модель, в которой введена зависимость K_τ от концентрации легирующей примеси [133]:

для n-типа

$$K_\tau = a + b \cdot \left[\ln \left(\frac{n_{\text{неосн}} + n_i}{n_{\text{осн}}} \right) \right]^2 + c \cdot \ln \left(\frac{N_{\text{осн}}}{n_i} \right) \cdot \left[\ln \left(\frac{d}{\delta} + 1 \right) \right]^{0,5}, \quad (2.7)$$

для p-типа

$$K_\tau = a + f \cdot \ln \left(\frac{N_{\text{осн}}}{m} \right) \cdot \left[\ln \left(\frac{n_{\text{неосн}} + n_i}{n_{\text{осн}}} \right) \right]^2, \quad (2.8)$$

где: $n_{\text{неосн}}$, $n_{\text{осн}}$ – концентрация неосновных и основных носителей заряда; δ – уровень инжекции; $N_{\text{осн}}$ – концентрация легирующей примеси; n_i – собственная концентрация носителей заряда; a , b , c , d , f , m – численные коэффициенты.

В исходный код физической модели времени жизни неравновесных носителей заряда в Synopsys Sentaurus, написанный на языке программирования C#/C++, были добавлены выражения (2.6), (2.7), (2.8) для учёта влияния интегрального потока нейтронов. Далее модифицированные модели были скомпилированы и подключены в Synopsys Sentaurus Device с использованием программного интерфейса физических моделей (Physical Model Interface — PMI) для расчёта электрических характеристик.

Поверхностная рекомбинация. Для моделирования характеристик с учётом ионизационных эффектов необходимо добавить в Synopsys Sentaurus Device следующее уравнение для зависимости скорости поверхностной рекомбинации от поглощённой дозы [134]:

$$S_0(D) = \sigma \cdot v_{th} \cdot \pi \cdot k_B \cdot T \cdot N_{it}(\Phi_n), \quad (2.9)$$

где $\sigma = \sqrt{\sigma_p + \sigma_n}$;

S_0 – скорость рекомбинации;

σ_n , σ_p – сечение захвата электрона и дырки ловушкой, соответственно,

v_{th} – тепловая скорость электронов,

$N_{it}(\Phi_n) = a_{it} \Phi_n^{b_{it}}$ – концентрация ловушек на границе раздела Si/SiO₂ в зависимости от интегрального потока нейтронов Φ_n ,

a_{it} , b_{it} – численные коэффициенты.

Генерация электрон-дырочных пар в оксиде при воздействии стационарного гамма излучения является процессом, зависимым от электрического поля, и описывается выражением:

$$G_r = \left(\frac{E+E_1}{E+E_0} \right)^m g_0 D, \quad (2.10)$$

где E – электрическое поле,

D – мощность дозы,

g_0 – ионизационная постоянная для SiO_2 ,

E, E_1 и m – константы.

Деградации подвижности носителей заряда при воздействии ионизационного излучения учитывается следующим образом:

$$\mu(D) = \frac{\mu_0}{(1+\alpha N_{it}(D))}, \quad (2.11)$$

$$N_{it}(D) = a_{it} D^{b_{it}}, \quad (2.12)$$

где μ_0 — подвижность в канале необлученного устройства ($\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$),

D — поглощённая доза излучения,

α, a_{it}, b_{it} — коэффициенты модели.

Для р-канального КНИ МОП-транзистора со следующими параметрами: $L = 2$ мкм, $W = 72$ мкм, $t_{\text{ox}} = 30$ нм, $t_{\text{si}} = 80$ нм, $t_{\text{BOX}} = 400$ нм, $N_{\text{ch}} = 2,4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (рисунок 2.6) проводилось приборно-технологическое моделирование с учётом влияния нейтронного излучения. На рис. 2.7 приведены результаты сравнения экспериментальных [23] и смоделированных сток-затворных характеристик р-канального КНИ МОП-транзистора при воздействии нейтронов с потоком $2,2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, подтверждающие адекватность используемой модели.

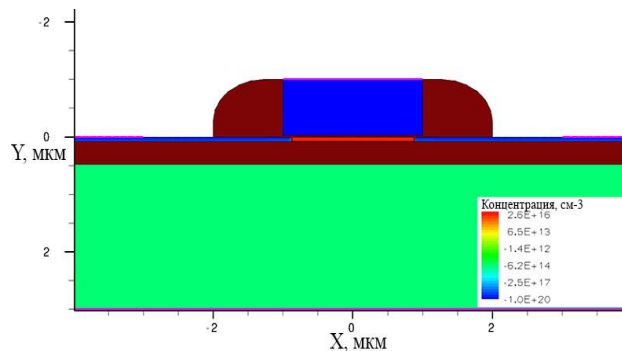


Рис. 2.6. Распределение концентрации в структуре р-канального 2 мкм КНИ МОП-транзистора

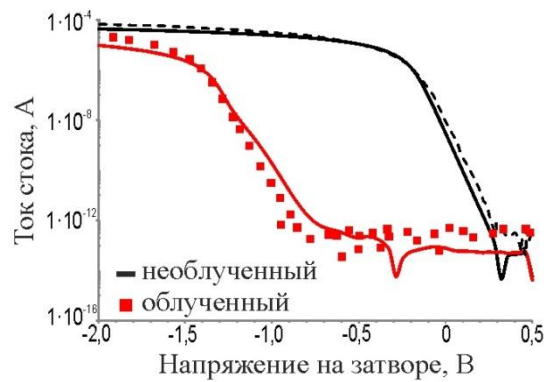


Рис. 2.7. Сравнение измеренных (пунктирная линия) [23] и смоделированных (сплошная линия) сток-затворных характеристик p-канального КНИ МОП-транзистора до и после воздействия нейтронов с потоком $2,2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$

Для n-канального КНИ МОП-транзистора со следующими параметрами: $L = 0,5 \text{ мкм}$, $W = 8 \text{ мкм}$, $t_{\text{ox}} = 7,5 \text{ нм}$, $t_{\text{Si}} = 50 \text{ нм}$, $t_{\text{BOX}} = 190 \text{ нм}$, $N_{\text{ch}} = 3,1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (рисунок 2.8), проведено приборно-технологическое моделирование с учетом протонного излучения. На рис. 2.9 приведено сравнение измеренных (точки) [130] и смоделированных (линии) сток-затворных характеристик n-канального КНИ МОП-транзистора до и после воздействия протонов с дозой 150 и 500 крад.

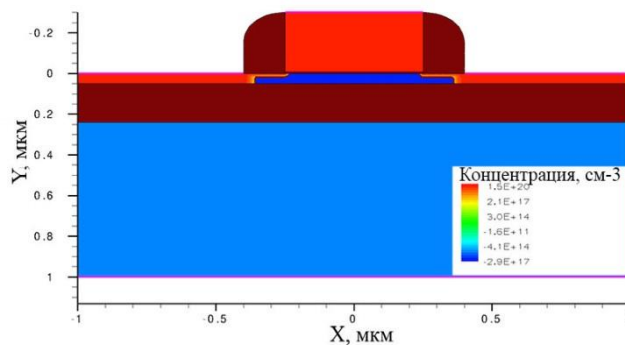


Рис. 2.8. Распределение концентрации в структуре n-канального 0,5 мкм КНИ МОП-транзистора

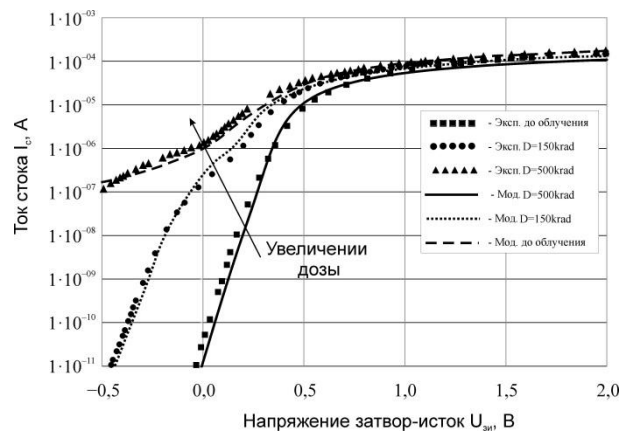


Рис. 2.9. Сравнение измеренных [130] и смоделированных сток-затворных характеристик n-канального КНИ МОП-транзистора до и после воздействия протонов с дозой 150 и 500 крад

Из сравнения результатов приборно-технологического моделирования и экспериментальных характеристик для субмикронных и глубоко субмикронных МОП-транзисторов видно, что расхождение составляет не более 10-20% в широком диапазоне поглощённых доз и интегральных потоков.

2.2 Квази-трехмерная модель для расчета тока утечки в структурах КНИ МОПТ

Эффективным инструментом оценки радиационной стойкости различных конструктивно-технологических решений КМОП КНИ элементов является 2D/3D TCAD моделирование. С помощью TCAD расчетов могут быть получены оценки радиационной деградации таких важных параметров МОПТ КНИ как пороговое напряжение $U_{пор}$, крутизна S , предельные частоты усиления f_{max}/f_T , ток утечки $I_{утеч}$. В отечественных и зарубежных публикациях было показано, что для оценки радиационных изменений $U_{пор}$, S , f_{max}/f_T достаточно моделирования традиционной 2-х мерной структуры прибора. Однако, для определения тока утечки необходимо использовать 3-х мерное описание МОПТ структуры. Это объясняется тем, что в толстом оксиде SiO_2 мелкой щелевой изоляции (Shallow Trench Isolation – STI) и нижнего скрытого оксида (Buried Oxide – BOX) под действием ионизирующего излучения накапливается положительный заряд $Q_{от}$, а на границе раздела оксид-кремний ($SiO_2 - Si$) индуцируются поверхностные состояния с плотностью N_{it} . Причем величины $Q_{от}$ и N_{it} зависят от интенсивности радиационного

воздействия. Это приводит к инверсии приповерхностного слоя вдоль боковой изоляции и скрытого оксида, и образованию паразитных каналов для тока утечки (рисунок 2.10).

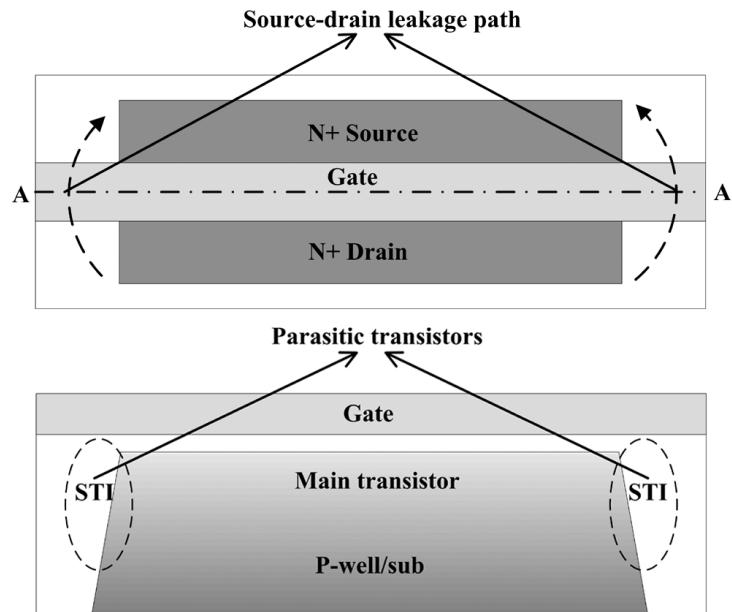


Рис. 2.10. Образование каналов утечки в структурах основного транзистора (а); паразитного бокового транзистора (б)

Из рисунка 2.11 видно, что области STI-изоляции, окружающие по бокам активную МОП-структуру, в нижней своей части встроены в слой скрытого оксида BOX. Таким образом, боковой и нижний паразитные МОП-транзисторы включены параллельно, и токи утечки складываются $I_{\text{утеч}} = I_{\text{утечбок}} + I_{\text{утечнижн}}$. Ранее было показано, что основной вклад в ток утечки вносит боковая составляющая $I_{\text{утечбок}}$ [135], [136].

Для современных субмикронных МОПТ КНИ-структур током утечки стока основного верхнего транзистора можно, как правило, пренебречь. Во-первых, в тонком слое оксида активной МОПТ структуры (толщиной от 1 до 10 нанометров) радиационно-индуцированный положительный заряд в слое SiO_2 или/и отрицательный заряд в слое HfO_2 достаточно малы. Во-вторых, для совершенной, хорошо отработанной технологии плотность радиационно-индуцированных дефектов на границе оксид-кремний N_{it} также достаточно мала. Как следствие, ток утечки стока $I_{\text{утеч}}$ и сдвиг порогового напряжения входной ВАХ основного транзистора пренебрежительно малы по сравнению с аналогичными величинами для паразитных бокового и нижнего транзисторов. В качестве примера, на рисунке 2.12 представлены вольт-амперные характеристики до и после облучения для основного 0,25 мкм МОП-транзистора (gate) и паразитного МОП-транзистора (field or edge) [136].

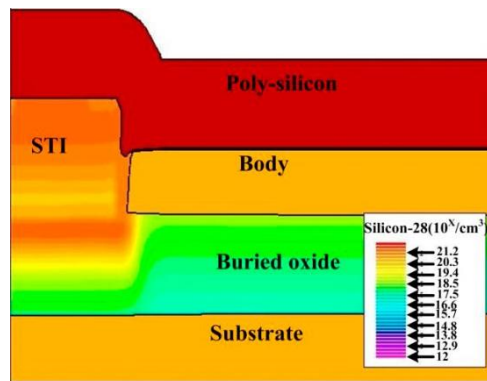


Рис. 2.11. Расположение бокового и скрытого слоя относительно активной области [135]

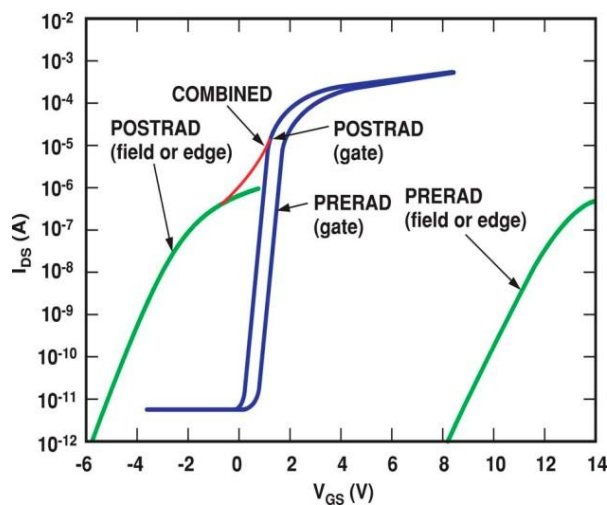


Рис. 2.12. Воль-амперные характеристики основного и паразитного МОП-транзисторов [136]

Из-за большой толщины бокового оксида до облучения пороговое напряжение бокового транзистора достаточно велико, но после облучения в толстом боковом оксиде накапливается положительный заряд, достаточный чтобы вызвать заметный сдвиг порогового напряжения. Сдвиг порогового напряжения может быть настолько большой, что ток текущей по боковой грани будет вносить значительный вклад в общий ток утечки структуры в режиме OFF. Необходимо отметить, что ток, текущий через такой паразитный транзистор, зависит от напряжения на затворе, так как область утечки располагается в углу между мелкой-щелевой изоляцией и подзатворным оксидом (рисунок 2.11). Что касается основного транзистора, то на рисунке 2.12 видно, что радиационной сдвиг порогового напряжения $\Delta U_{\text{пор}}$ и величина тока утечки стока в режиме OFF, существенно меньше, чем для паразитного транзистора.

Как было отмечено выше, в случае 2D моделирования МОП-транзистора невозможно учесть влияние бокового паразитного транзистора. Таким образом, необходимо

проводить 3D моделирование полной структуры вместе со слоем мелкой-щелевой изоляции. Программа Synopsys Sentaurus TCAD позволяет провести такое моделирование, однако количество элементов разностной сетки для расчета структуры исчисляется десятками тысяч, что в сумме со сложностью моделирования процесса захвата заряда в оксиде и инверсии слоя в приграничной области приводит к очень большим затратам машинного времени. В частности, по результатам работы [95] среднее время моделирования одной ветви сток-затворной ВАХ для трехмерной структуры МОПТ КНИ с размерами $W/L=1,5/0,35$ мкм, состоящей из 165000 элементов разностной сетки (рисунок 2.13) составил 11 часов на ЭВМ с четырехъядерным процессором Intel i7 с частотой 3400 МГц и оперативной памятью 16 Гбайт.

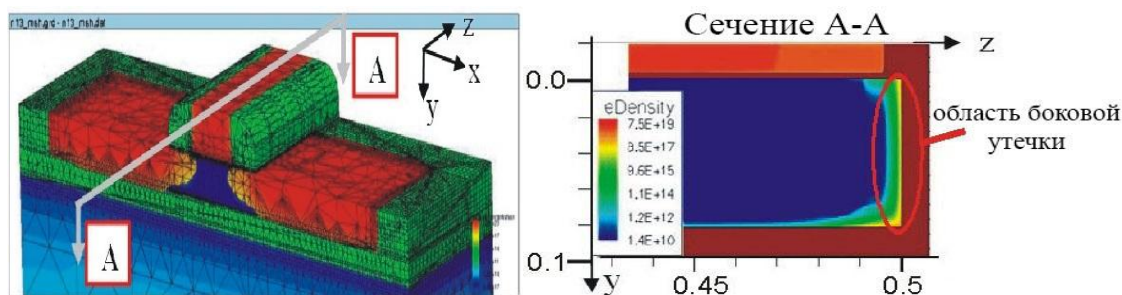


Рис. 2.13. КНИ МОПТ структура (слева) и поперечное сечение с указанием области утечки по боковой грани на границе STI/Si (справа)

Этот пример, а также результаты других работ ([122] и [137]), показывают, что полностью 3-х мерное моделирование (fully 3D), учитывающее с высокой точностью реальную конфигурацию транзисторной структуры и происходящие в ней физические эффекты, является полезным инструментом для исследования различных конструктивно-технологических решений МОПТ структур, требующим, однако, больших трудовых и временных затрат на предварительное описание структуры прибора, сам расчет как таковой, обработку и интерпретацию полученных результатов расчета.

Как инструмент инженера-разработчика fully 3D моделирование малоприспособно для оперативной оценки характеристик п/п приборов в реальных условиях эксплуатации и для расчета большого количества вариантов, в первую очередь из-за очень больших затрат времени ЭВМ на расчет. Для решения данной задачи в работе [138] был предложен квази-трехмерный подход, сводящий решение сложной 3-х мерной задачи к совокупности двух взаимосвязанных существенно более простых и менее затратных по времени счета 2-х мерных задач, решаемых соответственно в плоскости XY традиционного

поперечного разреза п/п структуры прибора (задача №1) и в плоскости XZ продольного разреза структуры прибора в сечении А-А на рисунке 2.13-б (задача №2). Выигрыш по времени при использовании квази-3D подхода позволил уменьшить время моделирования в 8 раз по сравнению с fully-3D подходом для структуры 0,35 мкм МОПТ КНИ, приведенной на рисунке 2.13. Погрешность расчетов ВАХ в диапазоне ионизационных доз до 300 крад не превысила 15%.

Недостатком ранее предложенной квази-3D модели является наличие в ней промежуточного этапа стыковки результатов 2D-расчета структуры прибора в двух разных плоскостях XZ и XY. Радиационно-индуцированный заряд, распределенный по боковым граням в плоскости XZ (рисунок 2.13-б) необходимо проинтегрировать и перенести в 2D-модель основного транзистора в плоскости XY для расчета составляющей тока боковой утечки.

Дальнейшим развитием предложенного метода является 3D моделирование тока утечки структуры паразитного МОПТ. Этот ток определяется непосредственно по результатам моделирования «сверхузкого» паразитного бокового МОП-транзистора, образующегося на вертикальной границе Si/STI (рисунок 2.14). Этот транзистор имеет поликремневый затвор, толстый подзатворный окисел t_{STI} , тонкий слой кремния ΔZ_{SIDE} , в котором локализуется радиационно-индуцированный заряд подвижных носителей (рисунок 2.13-б), а также фиктивные контакты стока, истока, подложки и кармана. В такой приборной структуре токи бокового паразитного транзистора вычисляются на контактах в программе Sentaurus для любых приложенных напряжений и доз внешнего ионизирующего излучения. Распределения плотностей радиационно-индуцированных дефектов в объеме SiO_2 оксида N_{ot} и на поверхности Si/ SiO_2 раздела N_{it} задаются на основании экспериментальных данных для соответствующей КМОП КНИ технологии [137], [139].

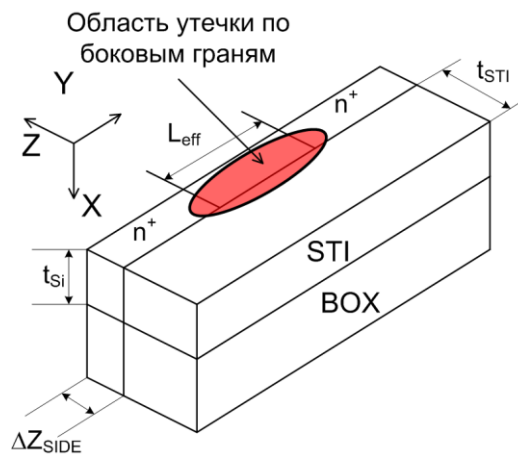


Рис. 2.14. Изображение «сверхузкого» паразитного бокового МОП-транзистора

На рисунке 2.15 приведена ВАХ до и после воздействия радиации для основного и паразитного бокового МОП-транзисторов, изготовленного по технологии 0,13 мкм со следующими параметрами структуры $L/W=0,35/10$ мкм, $t_{ox}=7$ нм, $t_{BOX}=145$ нм, $t_{STI}=130$ нм, $N_A=8 \cdot 10^{17}$ см⁻³, воздействие ионизирующего излучения до 500 крэд. Где промоделированный ток представляется в виде сумму токов тока полученного в результате стандартного 2D моделирования, учитывающий ток основного транзистора и паразитный ток на границе со скрытым оксидом, и 3D моделирования тока по границе с мелко щелевой изоляцией, то есть паразитного бокового транзистора (отдельно представлен на рисунке 2.16). Для этого моделировалась структура, у которой отсутствует поликремниевый затвор над областью кремния, то есть контакт gate влияет только на область STI. При расчетах для задания радиационного-индуцированных плотностей дефектов N_{ot} в объемных слоях оксида SiO₂ для BOX и STI областей и на поверхностях раздела Si/SiO₂ – N_{it} , использовались радиационные модели базирующегося на экспериментальных данных, полученных для 0,13 мкм КМОП технологии, описанные в [139].

Для всех структур использовались следующие физические модели:

- Рекомбинация: SRH(DopingDep), Auger;
- Подвижность: PhuMob, CarrierCarrierScattering, DopingDep, Enormal;
- Модель сужения ширины запрещенной зоны кремния.

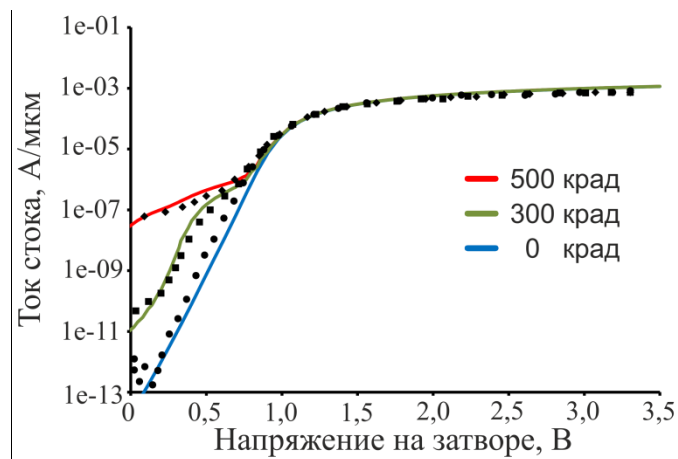


Рис. 2.15. Сравнение экспериментальных (точки) [140] и промоделированных (линии) сток-затворных ВАХ до и после облучения различными дозами

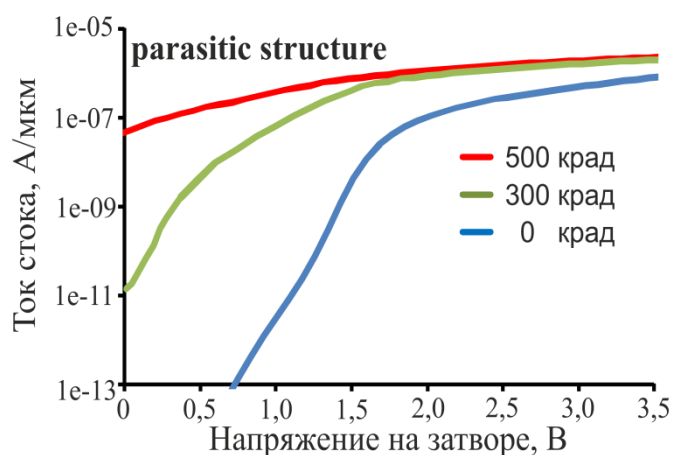


Рис. 2.16. Промоделированные ВАХ паразитного бокового МОП-транзистора

Рисунок 2.15 качественно повторяет рисунок 2.12.

Затраты машинного времени на квази-3D расчет ВАХ МОПТ КНИ с приведенными выше параметрами составляет 71 минута, что в 9 раз меньше, чем затраты на fully-3D расчет, которые составляют порядка 11 часов. Расчёты по квази-3D модели хорошо согласуются с экспериментальными данными [140], погрешность расчетов не превышает 10%.

Для расчета радиационных токов утечки в субмикронных МОП КНИ транзисторных структурах предложена квази-трехмерная модель, применение которой позволяет в десять раз сократить время счета на ЭВМ и существенно упрощает препроцессорное описание структуры прибора в системе TCAD.

Традиционная 3D задача расчета МОПТ в программе Synopsys TCAD заменена на две стандартные подзадачи: 2D расчет структуры основного МОПТ и 3D расчет паразитной боковой МОПТ STI структуры. Обе подзадачи решаются независимо, определяя

ются составляющие тока утечки основного $I_{\text{утечМОП}}$ и бокового паразитного $I_{\text{утечбок}}$ транзисторов, которые затем суммируются для определения общего тока утечки $I_{\text{утеч}}=I_{\text{утечМОП}}+I_{\text{утечВОХ}}+2 \cdot I_{\text{утечбок}}$.

На примере 0,35 мкм КНИ МОП-транзистора при воздействии ионизирующего излучения с дозой до 500 крэд показано, что по сравнению с традиционным fully-3D моделированием, требующим 11 часов расчета на ЭВМ, время счета для семейства ВАХ $I_c=f(U_{зи})$ (рисунок 2.15) сокращено до 71 минуты (т.е. время счета уменьшилось в 9 раз).

2.3 Выводы по главе 2

1. Разработана модель, учитывающая влияние структурных и ионизационных эффектов, обусловленных действием нейтронов, гамма-излучения и протонов, на электрофизические и электрические характеристики МОП-транзисторов, изготовленных по технологии объёмного кремния и кремния на изоляторе.

Разработанная модели встроена в промышленный вариант Synopsys Sentaurus TCAD и может быть использована для проектирования радиационно-стойких МОПТ и КНИ МОПТ, позволяя прогнозировать их электрические характеристики при воздействии нейтронного, протонного и гамма-излучений;

2. Для расчета радиационных токов утечки в субмикронных МОП КНИ транзисторных структурах предложена квази-трехмерная модель, применение которой позволяет в десятки раз сократить время счета на ЭВМ и существенно упростить препроцессорное описание структуры прибора в системе TCAD.

На примере 0,35 мкм МОП КНИ транзистора при воздействии ионизирующего излучения с дозой до 500 крад показано, что по сравнению с традиционным fully-3D моделированием, требующим 11 часов расчета на ЭВМ, время счета для семейства ВАХ $I_c=f(U_{зи})$ на рисунке 2.15 сокращено до 71 минуты (т.е. время счета уменьшилось в 9 раз).

Глава 3 TCAD модель субмикронных МОПТ с учетом эффектов саморазогрева и высоких и низких внешних температур

На основе КМОП КНИ технологии активно ведутся работы по созданию высоко-температурных полупроводниковых микросхем для различных применений. Очевидно, что возникающие задачи не могут быть эффективно решены без использования методов и средств компьютерного моделирования. При этом ключевым элементом данной проблемы является наличие адекватных по точности описания характеристик и приемлемых, с точки зрения времени расчета, математических моделей элементов КМОП КНИ ИС. В настоящее время используемые TCAD модели КМОП-элементов направлены на моделирование электрических характеристик приборов до рабочих температур, не превышающих $+125^{\circ}\text{C} \dots +150^{\circ}\text{C}$.

Однако приборы, используемые в автомобильной, авиационной, космической и горнодобывающей промышленности, работают в условиях, в которых температура достигает значений $300^{\circ}\text{C} \dots 350^{\circ}\text{C}$. Существующие приборно-технологические модели не гарантируют получение адекватных результатов для современных глубоко субмикронных и нанометровых МОП-транзисторов работающих при таких температурах.

3.1 TCAD модель субмикронных МОПТ с учетом статического и динамического эффекта саморазогрева

Одной из проблем современных наноразмерных и субмикронных МОП-транзисторов является локальное повышение температуры вследствие рассеивания мощности в области канала [141]. В МОП-структурах такое тепло из области канала отводится через металлические контакты истока и стока, область затвора, диэлектрическую изоляцию и подложку. В КНИ структура, под областью канала расположен слой скрытого оксида кремния (BOX). Теплопроводность такого слоя на два порядка меньше ($\sim 1,4 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$), чем у объемного кремния ($\sim 149 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$), что приводит к ещё большему увеличению температуры в активной области МОП-транзистора. Как следствие, повы-

шение температуры структуры и плотная компоновка на кристалле приводят к ухудшению их характеристик [142], [143].

Стандартный набор физических моделей Synopsys Sentaurus TCAD позволяет моделировать характеристики полупроводниковых приборов в широком диапазоне температур и в том числе с учетом эффекта саморазогрева [1]. Для расчета температуры внутри структуры используется термодинамическая модель переноса носителей. В дополнение к решению уравнения Пуассона и уравнений непрерывности носителей заряда добавляется уравнение температуры кристаллической решетки. С помощью термодинамической модели становится возможен учет нагрева структуры при протекании в ней больших плотностей токов (закон Джоуля-Ленца).

По умолчанию, в Synopsys TCAD для расчета теплопроводности кремния используется зависимость от температуры, представленная на рисунке 3.17. Данная зависимость действительна в диапазоне температур от 200 до 600 К [1].

$$\kappa(T) = \frac{1}{a+bT+cT^2}, \quad (3.13)$$

где $a=0,03 \text{ см}\cdot\text{К}\cdot\text{Вт}^{-1}$, $b=1,56\cdot 10^{-3} \text{ см}\cdot\text{Вт}^{-1}$ и $c=1,65\cdot 10^{-6} \text{ см}\cdot\text{К}^{-1}\cdot\text{Вт}^{-1}$.

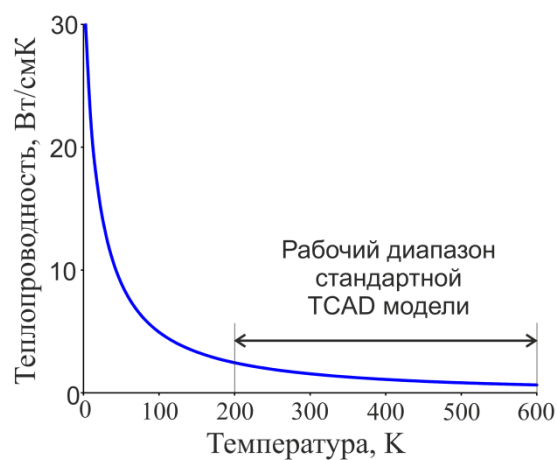


Рис. 3.17. Стандартная зависимость теплопроводности кремния от температуры [1]

Функция (3.13) учитывает зависимость теплопроводности только от температуры и не учитывает зависимость значения теплопроводности от толщины и степени легирования слоя кремния.

Влияние степени легирования и толщины активной области на теплопроводность слоя кремния. В работе [144] авторами отмечено, что значительное влияние на локальный нагрев оказывает зависимость теплопроводности от степени легирования слоя кремния [145]. Известно, что теплопроводность у сильнолегированных слоев кремния в

несколько раз меньше вследствие повышенного рассеивания фононов на ионах примеси [146].

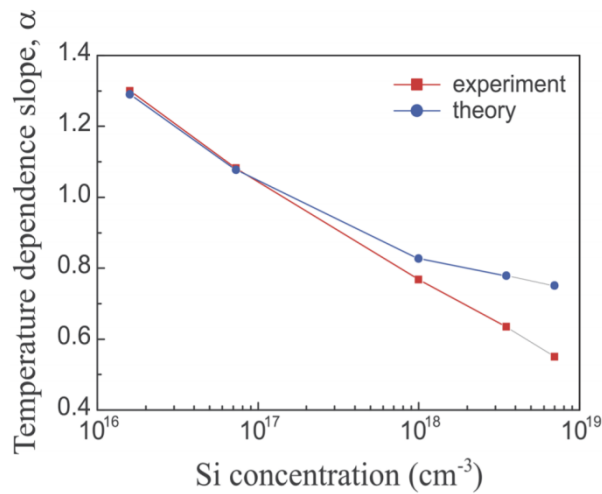


Рис. 3.18. Зависимость теплопроводности от степени легирования кремния [145]

Ещё одним фактором, оказывающим значительное влияние на локальный нагрев, является зависимость теплопроводности от толщины слоя кремния вследствие рассеивания фононов на границе активной области. В работе [47] авторами обобщены данные значений теплопроводности для толщины кремния от 10 нм до 1000 нм.

На рисунке 3.19 представлены экспериментальные данные для значения теплопроводности в зависимости от толщины слоя кремния.

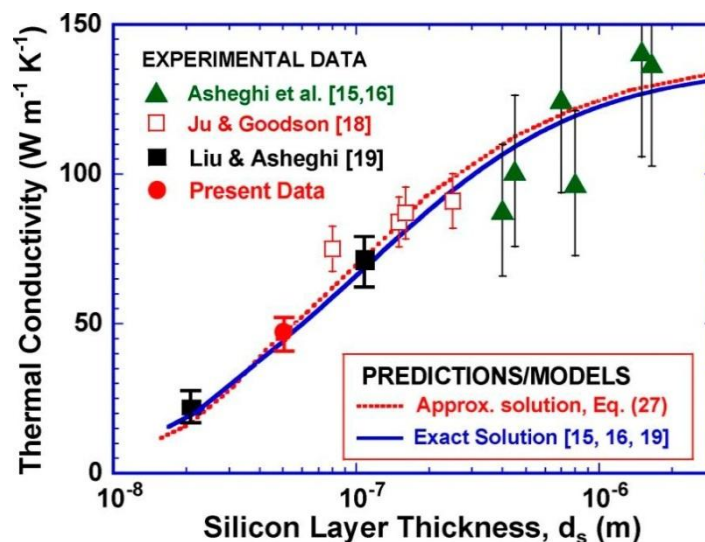


Рис. 3.19. Экспериментальные данные [47] для значений теплопроводности в зависимости от толщины слоя кремния

На основе приведенных экспериментальных данных была получена зависимость теплопроводности от толщины слоя кремния.

$$\kappa(t_{Si}) = 113,65 + 23 \cdot \ln(t_{Si}), \quad (3.14)$$

которая была введена в среду Sentaurus TCAD с помощью программного физического интерфейса (physical model interface — PMI).

Учет зависимости теплопроводности в диапазоне температур меньше 200 К. Как уже было сказано выше встроенная зависимость теплопроводности от температуры работает в диапазоне температур от 200 К до 600 К. На основе экспериментальных данных работы [146] (рисунки 3.21 и 3.22) были получены зависимости теплопроводности от температуры в двух диапазонах от 20 К до 70 К (3.15) и от 70 К до 200 К (3.16). На рисунке 3.20 представлено сравнение предложенных зависимостей и встроенной зависимости теплопроводности.

$$\kappa(T) = -0,002 \cdot T^2 + 0,2731 \cdot T - 2,6816, \quad (3.15)$$

$$\kappa(T) = 0,0001 \cdot T^2 - 0,0598 \cdot T + 10,276, \quad (3.16)$$

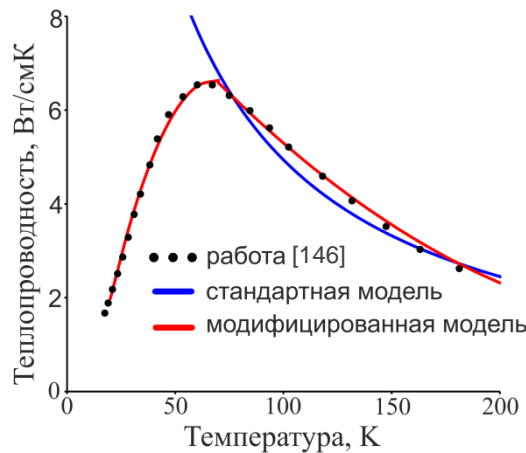


Рис. 3.20. Сравнение предложенных зависимостей и встроенной зависимости теплопроводности

Авторами работы [146] изучена зависимость теплопроводности атомов фосфора (рисунок 3.21) и бора (рисунок 3.22) в диапазоне температур от 10 до 300 К.

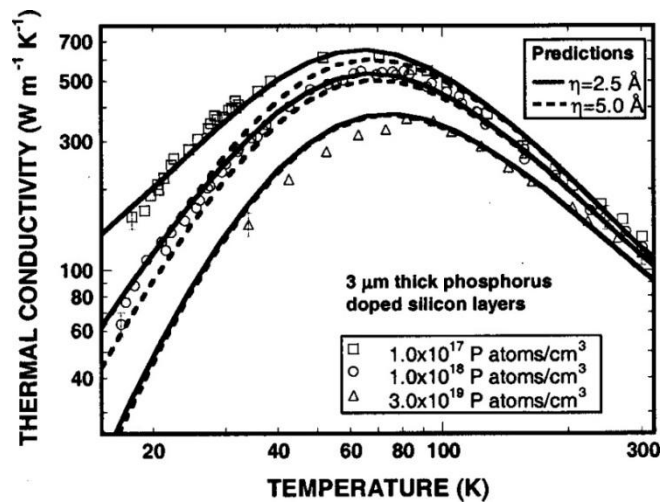


Рис. 3.21. Зависимость теплопроводности атомов фосфора от температуры для различных концентраций [146]

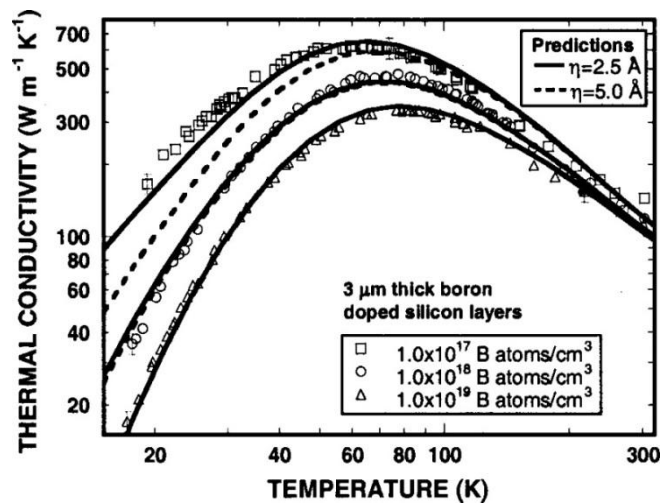


Рис. 3.22. Зависимость теплопроводности атомов бора от температуры для различных концентраций [146]

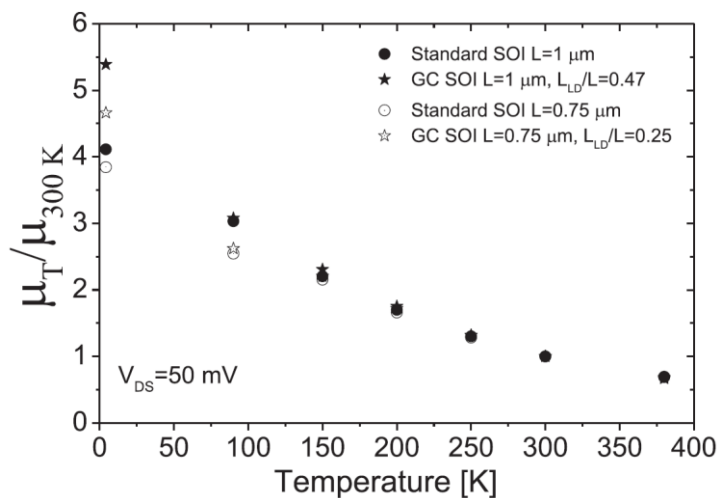


Рис. 3.23. Зависимость подвижности носителей заряда в диапазоне температур от 4 К до 400 К [62]

На основе выше приведенных экспериментальных данных были получены зависимости теплопроводности от степени легирования материала для областей электронной (3.17) и дырочной (3.18) проводимости, а так же зависимость подвижности носителей заряда (3.19) в диапазоне температур от 4 К до 400:

$$\kappa(Nd) = 10,13 - 0.1944 \cdot \ln(Nd), \quad (3.17)$$

$$\kappa(Na) = 10,13 - 0.2007 \cdot \ln(Na), \quad (3.18)$$

$$\kappa(T) = 4,4743 \cdot e^{-0,005\mu_{eff}}, \quad (3.19)$$

где N_d – концентрация электронов в см^{-3} , N_a – концентрация дырок в см^{-3} .

Приборно-технологическое моделирование эффекта саморазогрева. Для моделирования электрических характеристик МОП-транзисторов, изготовленных по технологии объемный кремний и кремний на изоляторе, с учетом влияния саморазогрева в исходный код модели расчета температуры структуры в выражение для расчета теплопроводности кремния были добавлены следующие функции с использованием программного физического интерфейса PМI:

- зависимость теплопроводности кремния от степени легирования;
- зависимость теплопроводности от толщины слоя кремния;
- зависимость теплопроводности от температуры в диапазоне температур от 20 К до 200 К;
- зависимость эффективной подвижности от температуры в диапазонное от 4 К до 400 К.

Результаты моделирования вольт-амперных характеристик с применением разработанной модели представлены в главе 4.

3.2 Модель сдвига порогового напряжения МОПТ, обусловленного совместным влиянием внешней температуры и гамма излучения

Современные МОПТ подвергаются радиационному воздействию в широком диапазоне температур. В работах [54]-[55] показано, что накопление заряда и радиационный сдвиг порогового напряжения в значительной степени зависят от температуры, при которой происходит облучение. Следовательно, важным аспектом для приборно-технологического моделирования радиационно-стойких МОПТ является учет температуры облучения.

Для оценки изменения сдвига порогового напряжения вводится параметр $\Delta U_{\text{сдвиг}}$:

$$\Delta V_{\text{сдвиг}}(T) = \frac{V_{th}(T)}{V_{th}(T_0)}, \quad (3.20)$$

На рисунке 3.24 представлена зависимость изменения ($\Delta U_{\text{сдвиг}}$) от температуры облучения.

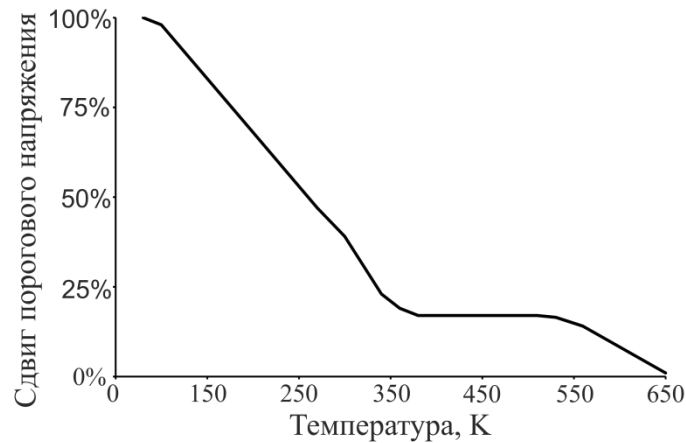


Рис. 3.24. Зависимость сдвига порогового напряжения от температуры [54]-[55]

Основным эффектом, объясняющим температурный сдвиг порога МОПТ, является отжиг накопленного заряда в оксиде. При низких температурах в оксиде кремния возле валентной зоны существуют электрически активные мелкие локальные уровни, которые при воздействии ионизирующего облучения способны захватить дополнительный положительный заряд [54]. Таким образом, после облучения при низкой температуре концентрация накопленного заряда в слое оксида увеличивается.

При повышенных температурах облучения увеличивается эмиссия электронов из полупроводника или металла, что приводит к снижению величины накопленного положительного заряда в подзатворном оксиде.

Стандартная радиационная модель Synopsys TCAD не учитывает наличие выше упомянутых локальных уровней и изменение накопленного заряда в зависимости от температуры облучения. Зависимость имеет линейный характер во всем диапазоне рассмотренных температур. Экспериментальная кривая имеет существенные отличия:

- 1) Экспоненциальная зависимость – температура ниже 330 К;
- 2) Линейная зависимость – температура от 330 К до 500 К;
- 3) Экспоненциальная зависимость – температура выше 500 К.

Нами было предложено модифицировать радиационную модель Synopsys TCAD, путем ввода зависимости концентрации ловушечных уровней в диэлектрике от температуры, полученной на основе данных [54]-[55]. С этой целью в командный файл Setaurus

Device введен поправочный коэффициент $\sigma(T)$ для объемной плотности ловушек в оксиде, зависящий от температуры. В зависимости от диапазона температуры облучения выбирается одна из зависимостей $\sigma(T)$, полученных путем экстракции из экспериментальных данных:

$$\text{для } T < 330 \text{ К} \quad \sigma(T) = 17686 \cdot e^{-0.028 \cdot T}, \quad (3.21)$$

$$\text{для } 330 \text{ К} < T < 500 \text{ К} \quad \sigma(T) = -0.0002 \cdot T + 3.1923, \quad (3.22)$$

$$\text{для } 500 \text{ К} > T \quad \sigma(T) = 984.07 \cdot e^{-0.0116 \cdot T}, \quad (3.23)$$

Для проверки адекватности введенных зависимостей были рассчитаны стокзатворные характеристики 0,25 мкм КНИ МОПТ при облучении дозой 500 крад.

Моделирование производилось с использованием следующих встроенных моделей представленных в Таблице 3.6.

Таблица 3.6. Физические модели, используемые для моделирования КНИ МОП-транзисторных структур с различной конфигурацией скрытого оксида.

Физический эффект	Выбранные физические модели
Перенос носителей заряда	Drift-Diffusion Model
Описание подвижности носителей заряда	Enormal High Field Saturation Doping Dependence
Генерация-рекомбинация носителей заряда	SRH(DopingDep)
Изменение ширины запрещенной зоны	Slotboom Model

Проведение моделирования в полном диапазоне температур показало, что при температуре ниже 280 К возникают сложности со сходимостью к решению Ньютона, что влечет за собой существенные временные затраты.

На рисунке 3.25 представлено сравнение стандартной и модифицированной модели зависимости $\Delta V_{\text{сдвиг}}$ от температуры облучения. Характер полученной зависимости соответствует экспериментальной зависимости (рисунок 3.25), полученной в предыдущих работах [54] и [55].

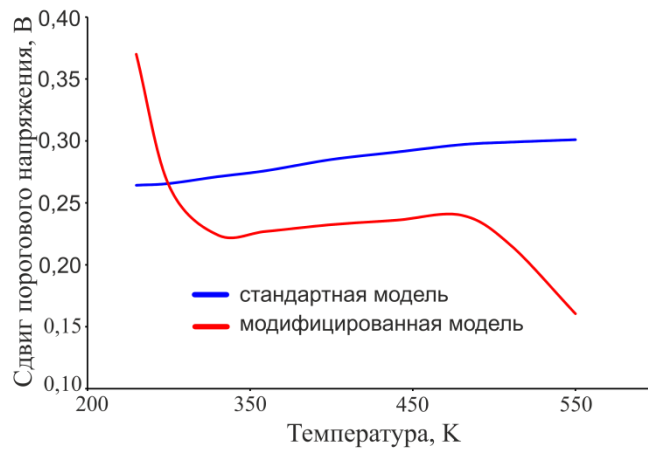


Рис. 3.25. Смоделированная с использованием стандартной и модифицированной модели зависимость изменения $\Delta V_{\text{сдвиг}}$ от температуры для 250 нм КНИ МОПТ. Доза облучения 500 крад

3.3 Выводы по главе 3

Разработана TCAD модель субмикронных МОП-транзисторов с учетом эффектов саморазогрева, высоких (до 300°C) и низких (до 4 К-50 К) внешних температур, и модель совместного учета воздействия внешней температуры и ионизирующего излучения.

В существующую стандартную температурную модель Synopsys TCAD внесены следующие нововведения:

- введены зависимости коэффициента теплопроводности от концентрации легирующей примеси и толщины активного слоя кремния;
- введена зависимость коэффициента теплопроводности от температуры для диапазона температур от 20 К до 200 К;
- введена зависимость эффективной подвижности носителей заряда от низкой температуры в диапазоне от 4 К до 400 К;
- введена зависимость концентрации ловушечных уровней от температуры для диапазона температур от 300 К до 550 К.

Результаты TCAD моделирования МОПТ структур с применением разработанных моделей представлены в главе 4.

Глава 4 TCAD-моделирование конструктивно-технологических разновидностей субмикронных КНИ МОПТ структур

В настоящее время в различных типах КМОП СБИС используются МОП-транзисторы, изготовленные по технологии кремний на изоляторе с длиной канала менее 100 нанометров. Такие транзисторы позволяют уменьшить занимаемую площадь, потребляемую мощность и повысить быстродействие. На фоне этих преимуществ имеется ряд особенностей, оказывающих значительное влияние на работу МОП-транзисторов. К ним относятся, появление эффектов короткого канала, худшие условия теплоотвода в КНИ структурах, а также возрастание радиационно-индуцированных токов утечки при облучении.

Конструкторами и технологами предложены различные конструктивно-технологические решения для устранения или уменьшения влияния этих эффектов путем изменения элементов конструкции МОП-транзистора.

В этой части следует выделить два основных направления: совершенствование профиля легирования канала и поиск новых конструкций изолирующего SiO_2 слоя, окружающего активную область прибора.

К первому направлению относятся:

- 1) структура с асимметричным легированием канала [59];
- 2) структура с областью собственной проводимости в канале со стороны стока – graded легирование [61];
- 3) структура с областью собственной проводимости в канале со стороны истока – «вставка» [147].

Ко второму направлению относятся:

- 1) структура со скрытым оксидом L-образной формы (quasi-SOI) [109];
- 2) структура с «окном» в скрытом слое SiO_2 (SELBOX – Selective Buried Oxide) [148];
- 3) структура с частично скрытым оксидом (Partial SOI) [149];
- 4) структура со сверхтонким скрытым оксидом (thin-BOX SOI) [150];

- 5) структура с тонким карманом и тонким скрытым оксидом (UTBB SOI) [151];
- 6) структура со скрытым оксидом на основе оксида алюминия (Alumina) [152];
- 7) структура со скрытым оксидом на основе оксида нитрида алюминия (AlN) [153];
- 8) структура со скрытым оксидом на основе оксида нитрида кремния (Si_3N_4) [154];
- 9) комбинированная структура, состоящая из скрытого слоя SiO_2 окруженного с обеих сторон, вертикальным слоем AlN с высокой теплопроводностью (High Thermal Conductivity Insulators) [115];
- 10) структура со слоем кремния, встроенного в скрытый оксид (Double SOI) [112].

К сожалению, эффективность перечисленных выше конструктивно-технологических разновидностей МОПТ КНИ структур не исследована в достаточной степени и требует углубленного рассмотрения. Эффективным инструментом для этого является TCAD моделирование. Опубликованных работ по этой проблеме крайне мало, а приведенные в них результаты не освещают проблему полностью. Для некоторых перечисленных выше структур публикации по TCAD моделированию вообще отсутствуют, особенно если это касается оценки температурной и радиационной стойкости.

В настоящей главе рассматриваются вопросы построения TCAD моделей для перечисленных выше конструктивно-технологических разновидностей МОП-транзисторов, изготовленных по технологии КНИ. Приводятся результаты анализа электрических характеристик этих структур, в том числе с учетом тепловых и радиационных воздействий.

4.1 Моделирование характеристик субмикронных МОПТ с асимметричным легированием канала

Практика показывает, что в глубоко субмикронных LDD МОПТ структурах с однородным легированием канала при приближении к $L_{\text{top}} < 0,2$ мкм начинает резко сказываться влияние короткоканальных эффектов, в частности, возрастание подпорогового S

(мВ/дек) и DIBL ($U_{пор}/U_{СИ}$) факторов, а также увеличение тока утечки в закрытом состоянии $I_{утеч}$ [155]. По этой причине в современных суб-0,1 мкм КМОП СБИС для подавления короткоканальных эффектов широко используется МОПТ структуры с halo-областями и асимметричным легированием канала. Пример конструкций таких транзисторов, изготовленных на объёмной и КНИ подложках, приведены на рисунках 4.26-4.27 соответственно.

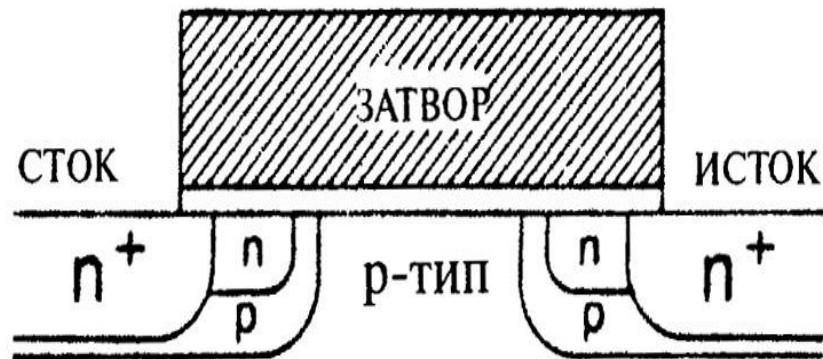


Рис. 4.26. Поперечное сечение симметричного n-МОПТ с halo-областями на объёмном кремнии [155]

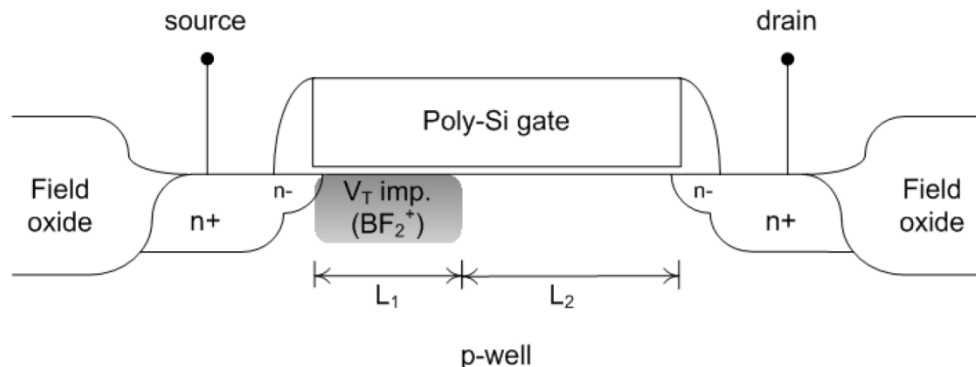


Рис. 4.27. Поперечное сечение КНИ n-МОПТ с асимметричным легированием канала [156]

Такие конструкции позволяют улучшить характеристики транзистора $U_{пор}(L_3)$, $U_{пор}(U_C)$ без увеличения подпорогового S-фактора.

Таким образом, МОПТ с неравномерным легированием канала обладают улучшенными короткоканальными характеристиками при незначительном увеличении паразитных емкостей pn-переходов. Это дает возможность создавать СБИС с высоким быстродействием и малой рассеиваемой мощностью.

Ряд работ был посвящен TCAD моделированию таких МОПТ структур [64]-[65]. Однако, в них рассчитывались только статические характеристики; динамические характеристики не исследовались. Кроме того, отсутствуют работы, посвященные TCAD моделированию температурной и радиационной стойкости подобных МОПТ структур.

В данной главе рассматриваются вопросы моделирования статических и динамических характеристик КНИ МОП-транзисторов с неравномерным легированием канала, работающих в обычных условиях, а также при воздействии ионизирующего излучения.

Моделирование субмикронных МОП-транзисторов с асимметричным легированием канала осуществляется посредством встроенных в Synopsys TCAD физических моделей. В таблице 4.7 представлены используемые физические модели для КНИ МОП-транзистора с длиной канала 80 нм.

Таблица 4.7. Физические модели, используемые для моделирования КНИ МОП-транзистора с асимметричным легированием канала.

<i>Физический эффект</i>	<i>Выбранные физические модели</i>
Перенос носителей заряда	Hydrodynamic
Квантование	Quantization Model
Описание подвижности носителей заряда	Enormal Philip Mobility High Field Saturation Doping Dependence
Генерация-рекомбинация носителей заряда	SRH(DopingDep) Auger
Туннелирование	DirectTunneling

Дрейфово-диффузионная модель переноса носителей заряда не подходит для моделирования субмикронных МОП-транзисторов. К примеру, используемые в дрейфово-диффузионной модели физические подходы не могут надлежащим образом описать превышение скорости насыщения и часто переоценивают темпы генерации при ударной ионизации. В этом случае для моделирования следует использовать гидродинамическую

модель переноса носителей заряда, которая обеспечивает достаточный компромисс между точностью и временными затратами на вычисления.

Современные технологии производства МОП-транзисторов уже достигают пределов квантово-механического масштабирования толщины подзатворного оксида, длины и ширины канала. Эффект квантования, который возникает вследствие этого, приводит к сдвигу порогового напряжения и уменьшению емкости затвора. А эффект туннелирования высокоэнергетических носителей заряда через сверхтонкий слой оксида под затвором приводит к возникновению тока утечки затвора. Следовательно, при моделировании использовались модели квантования и туннелирования через подзатворный оксид.

4.1.1 Моделирование статических характеристик

Для оценки влияния длины сильнолегированной области были рассмотрены три параметра: пороговое напряжение ($U_{пор}$), ток утечки ($I_{утечки}$) и ток включения ($I_{нас}$).

Сечение n-канального КНИ МОП-транзистора представлено на рисунке 4.28. Профиль распределения примеси вдоль канала n-канального МОП-транзистора представлен на рисунке 4.29. Топологическая и эффективная длина канала равны 80 нм. Толщина подзатворного оксида составляет 2 нм. Концентрация носителей в n^+ -областях истока и стока $1,0 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. LDD области имеют концентрацию $1,4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и глубину 9 нм. Пленка кремния имеет толщину 20 нм и концентрацию носителей $5,0 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Концентрация акцепторной примеси в канале для структуры с однородным легированием канала $1,0 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Для структуры с неравномерным легированием канала, в канале со стороны истока создана p^+ область с концентрацией акцепторов $2,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ [59].

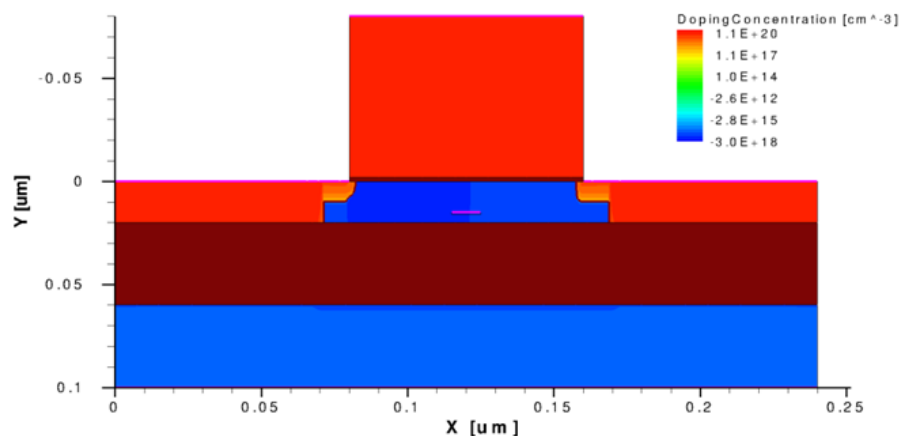


Рис. 4.28. Распределение концентрации n-канального транзистора МОПТ с $X_p=40$ нм (продольное сечение)

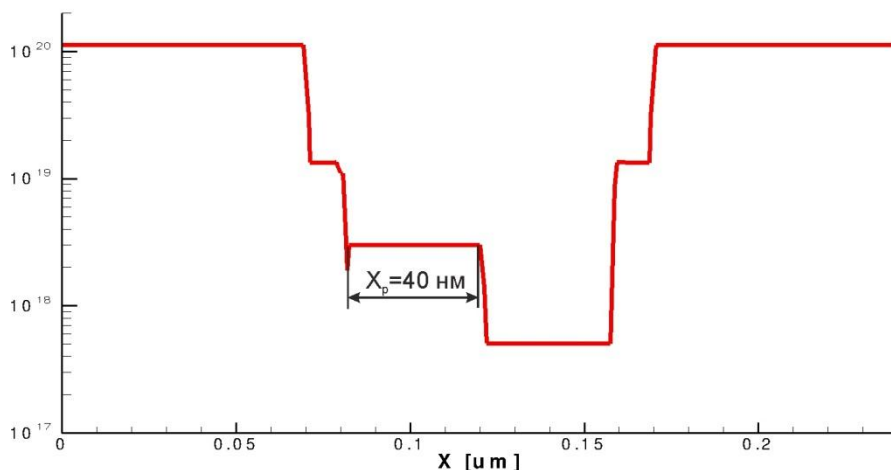


Рис. 4.29. Профиль легирования n-канального транзистора МОПТ с $X_p=40$ нм

Для оценки влияния асимметричного легирования канала длина сильнолегированной области $X_{p/n}$ изменялись в пределах 30...80 нм.

Проводилось моделирование сток-затворных характеристик при заземленных контактах истока и подложки, напряжение на истоке принимало значения 0,1 В или 1 В. Напряжение затвора изменялось от 0 до 1 В.

Можно утверждать, что ток утечки будет уменьшаться по экспоненциальному закону, ток включения уменьшаться и пороговое напряжение увеличиваться по линейному закону с увеличением $X_{p/n}$. На рисунках 4.30-4.32 и приведены зависимости основных параметров для n- и p- канальных МОП-транзисторов от длины сильнолегированной области.

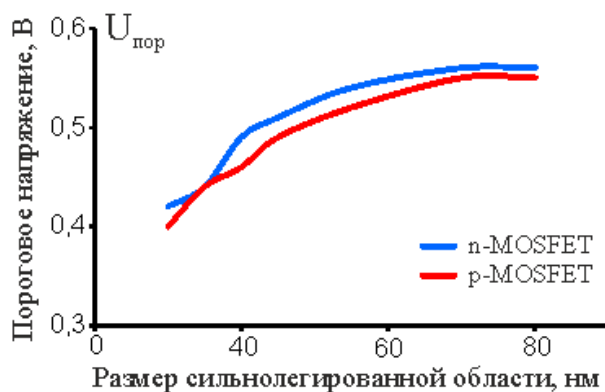


Рис. 4.30. Зависимость порогового напряжения от размера сильнолегированной области $X_{n/p}$

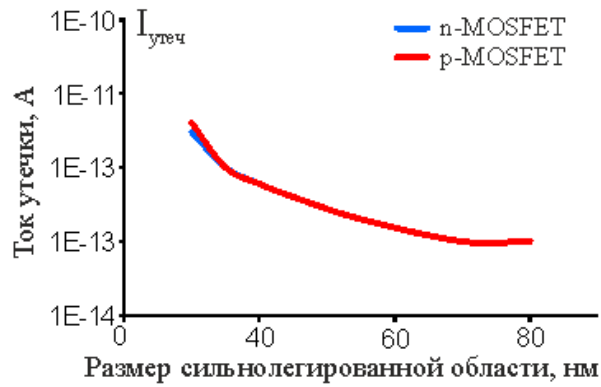


Рис. 4.31. Зависимость тока утечки от длины сильнолегированной области $X_{n/p}$

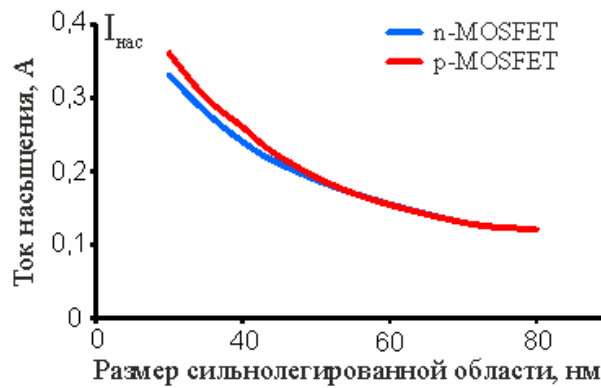


Рис. 4.32. Зависимость тока насыщения от длины сильнолегированной области $X_{n/p}$

При длине сильнолегированной области порядка 40 нм происходит значительное уменьшение тока утечки более чем на два порядка величины, и в то же время пороговое напряжение и ток включения изменяются гораздо слабее.

Оптимальной длиной сильнолегированной области является 40 нм. Необходимо обратить внимание, что при большей длине сильнолегированной области, эта область будет занимать почти весь канал. В итоге структура будет соответствовать МОП-транзистору с сильнолегированной областью канала, а не прибору с неравномерным легированием канала.

Приведенные результаты и выводы согласуются с результатами, полученными для аналогичного МОПТ специалистами компании Motorola [59].

4.1.2 Моделирование статических характеристик МОПТ, подвергнутого воздействию ионизирующего излучения

Было проведено моделирование сток-затворных характеристик транзисторов с неравномерным легированием канала аналогично главе 4.1.1 до и после воздействия ионизирующего γ -излучения с дозой 800 крад. Для оценки деградации характеристик исследовано изменение порогового напряжения, тока утечки и тока включения (таблица 4.8).

Таблица 4.8. Основные параметры n-канального МОП-транзистора до и после воздействия ионизирующего излучения с дозой 800 крад.

	$X_p, \text{нм}$							
	До облучения				После облучения			
	0	30	55	80	0	30	55	80
$U_{\text{пор}}, \text{В}$	0,25	0,42	0,54	0,56	0,18	0,26	0,30	0,32
$I_{\text{утечки}}, \text{А}$	2E-10	3E-12	2E-13	1E-13	2E-09	2E-10	5E-11	4E-11
$I_{\text{нас}}, \text{мА}$	0,47	0,33	0,17	0,12	0,29	0,26	0,20	0,18

Из данных таблицы 4.8 видно, что характеристики облученного МОП-транзистора с длиной сильнолегированной области 30 нм соответствуют характеристикам необлученного МОП-транзистора с однородно легированным каналом. Таким образом, можно сделать вывод, что использование неравномерного легирования канала повышает радиационную стойкость, и прежде всего по параметру тока утечки $I_{\text{утечки}}$.

Эти результаты моделирования подтверждаются экспериментальными результатами, полученными специалистами фирма IBM в [157].

4.1.3 Моделирование динамических характеристик

К сожалению, в работе [59] и других аналогичных работах зарубежных авторов отсутствуют оценки изменения динамических характеристик при изменении параметра $X_{p/n}$. С этой целью нами были исследованы динамические параметры КМОП ячеек на

основе КНИ МОП-транзисторов с неравномерным легированием канала. Чтобы не нарушать принцип комплементарности, использовались n- и p-канальные транзисторы, имеющие одинаковый размер сильнолегированной области.

Производился расчет переходного процесса для определения времени задержки сигнала при переключении из «1» в «0» и обратно. Для сокращения времени моделирования расчет динамических характеристик производился в среде SPICE, встроенной в Synopsys TCAD. Основные принципы описания элементов и схемы не отличаются от средств схемотехнического моделирования, таких как Cadence PSpice, Synopsys HSpice. Принципиальное отличие такого моделирования заключается в возможности прямого подключения в качестве элемента схемы результатов приборно-технологического моделирования структур МОП-транзисторов. На рисунке 4.33 представлен КМОП инвертер на основе n- и p-канальных 80 нм МОП-транзисторов с асимметричным легированием канала.

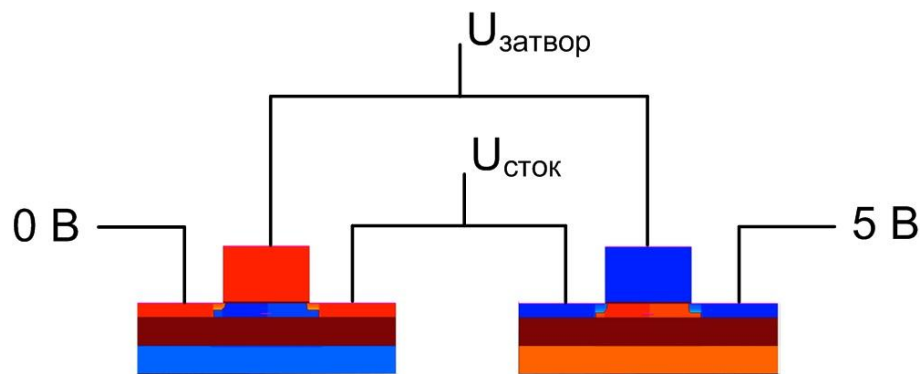


Рис. 4.33. КМОП инвертер на основе n- и p-канальных 80 нм МОПТ с асимметричным легированием канала

На вход схемы подается импульс напряжения с периодом 600 пкс. Нагрузочная емкость равна 10 фФ.

На рисунке 4.34 представлены результаты моделирования переходных характеристик КМОП ячеек.

На рисунке 4.35 представлена зависимость времен задержки сигнала от длины сильнолегированной области. Использование МОП-транзисторов с неравномерным легированием канала увеличивает время задержки переключения.

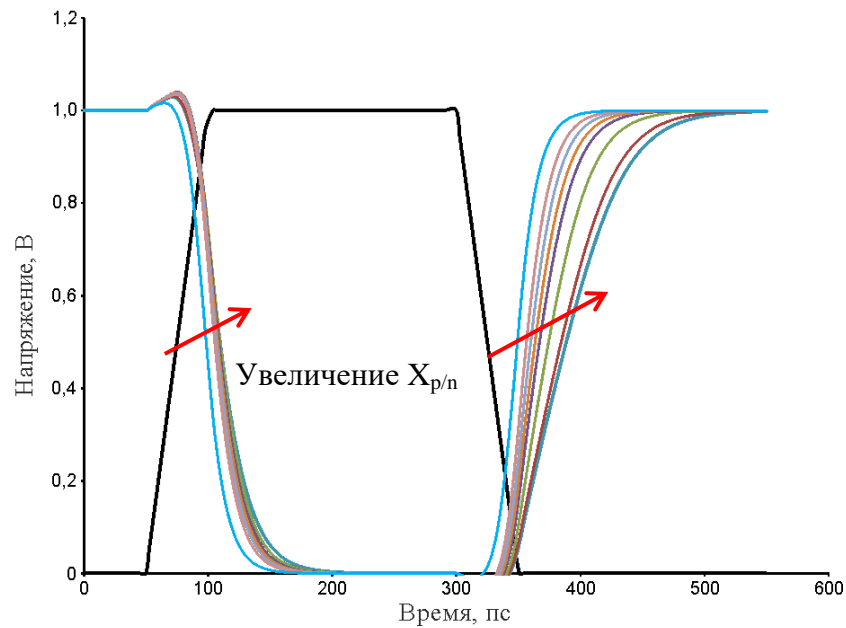


Рис. 4.34. Результаты моделирования процесса переключения КМОП ячейки

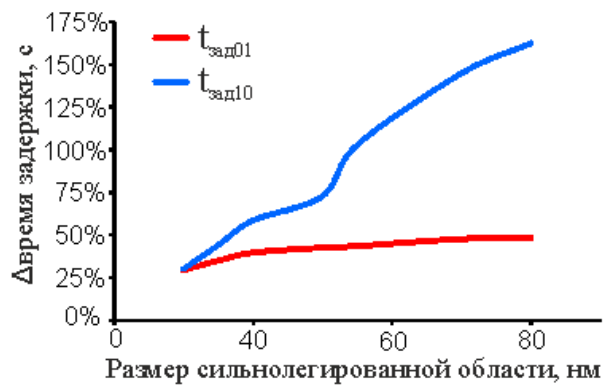


Рис. 4.35. Зависимость времени задержки t_{10} и t_{01} от длины сильнолегированной области $X_{n/p}$

В частности, для значения $X_{p,n}=40$ нм, выбранного в качестве оптимального для статических параметров $U_{пор}$, $I_{утеч}$, $I_{нас}$, величина тока утечки $I_{утеч}$ по сравнению со своим значением для КМОП-инвертера на однороднолегированных МОПТ уменьшилась на три порядка, в то время как, задержка $t_{зад}=(t_{10}+t_{01})/2$ увеличилась на 33%, что приемлемо с практической точки зрения.

4.2 Моделирование характеристик субмикронных КНИ МОПТ структур с различной конфигурацией скрытого оксида

На фоне имеющихся преимуществ КНИ МОП-транзисторов по сравнению с МОПТ, изготовленных по стандартной технологии на объемном кремнии, они имеют ряд недостатков:

1) Худшие условия отвода тепла из рабочей области транзистора. Теплоотвод из области канала в глубину структуры может осуществляться только через слои SiO_2 , обладающие в 100 раз меньшим коэффициентом теплопроводности $\lambda(\text{SiO}_2)=1,4 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ по сравнению с кремнием $\lambda(\text{Si})=149 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$. Это негативно сказывается на надежности и производительности микросхем [158].

2) При воздействии ионизирующего излучения в мелкой щелевой изоляции (STI – shallow trench isolation) и в скрытом оксиде (BOX – buried oxide) накапливается радиационно-индуцированный положительный заряд, который способствует протеканию тока утечки вдоль этих областей [159].

В этой связи, в последнее время было предложено несколько конструктивно-технологических разновидностей МОП КНИ структур с различной конфигурацией скрытого оксида. По оценкам специалистов наиболее перспективными из них являются:

- структура со скрытым оксидом L-образной формы (Quasi-SOI) [109];
- структура с «окном» в скрытом слое SiO_2 (SELBOX – Selective Buried Oxide) [148];
- структура с частично скрытым оксидом (Partial SOI) [149];
- структура со сверхтонким скрытым оксидом (thin-BOX SOI) [150];
- структура с тонким карманом и тонким оксидом (UTBB SOI) [151];
- структура со скрытым оксидом на основе оксида алюминия (Alumina) [152];
- структура со скрытым оксидом на основе оксида нитрида алюминия (AlN) [153];
- структура со скрытым оксидом на основе оксида нитрида кремния (Si_3N_4) [154];

- комбинированная структура, состоящая из скрытого слоя SiO_2 окруженного с обеих сторон, вертикальным слоем AlN с высокой теплопроводностью (High Thermal Conductivity Insulators) [115];
- структура со слоем кремния, встроенного в скрытый оксид (Double SOI) [112].

Перспективы применения этих МОПТ для массового производства различных типов СБИС в настоящее время оцениваются специалистами-технологами. Поэтому применение на этом этапе приборно-технологических САПР (TCAD) актуально и востребовано.

В имеющихся публикациях в основном приведены экспериментальные ВАХ перечисленных выше структур. Единичные работы посвящены TCAD моделированию эффектов саморазогрева и носят частный характер [148]. Аналогичная ситуация с работами посвященными TCAD моделированию радиационной стойкости [109], [160].

В настоящем разделе в значительной степени решена задача TCAD-моделирования конструктивно-технологических разновидностей МОПТ структур с различной конфигурацией скрытого оксида. С этой целью использовались TCAD-модели, разработанные нами для учета радиационных (Глава 2) и тепловых (Глава 3) эффектов.

Приборно-технологическое моделирование осуществлялось с физическими моделями, представленными в таблице 4.9.

Таблица 4.9. Физические модели, используемые для моделирования КНИ МОП-транзисторных структур с различной конфигурацией скрытого оксида.

<i>Физический эффект</i>	<i>Выбранные физические модели</i>
Перенос носителей заряда	Hydrodynamic
Описание подвижности носителей заряда	Enormal High Field Saturation Doping Dependence
Генерация-рекомбинация носителей заряда	SRH(DopingDep)
Модель статистики для электронов и дырок	Fermi

Для объективного анализа все перечисленные выше МОПТ структуры, имеют одинаковые размеры, уровни легирования активной области и одинаковые области мелкой целевой изоляции (Shallow Trench Isolation, STI). Исходной структурой для всех конфигураций является n-канальный МОП-транзистор с длиной канала 100 нм. Толщина оксида 2 нм, толщина активного слоя 70 нм, толщина скрытого слоя 80 нм, степень легирования канала $8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, степень легирования областей истока и стока $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, степень легирования LDD-областей истока и стока $4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

В качестве основного информационного параметра при оценке эффекта саморазогрева использовалась максимальная температура внутри структуры прибора T_{\max} . Она определялась для режима $U_{\text{СИ}}=2 \text{ В}$, $U_{\text{ЗИ}}=2 \text{ В}$.

Моделировалось воздействие ионизационного гамма излучения суммарной дозой 300 крад и 600 крад для оценки величины радиационно-индуцированного тока утечки от захваченного в скрытом оксиде положительного заряда. Для всех случаев описание ловушечных уровней осуществлялось идентично. Во время облучения МОП-транзисторы находились в режиме OFF (напряжение на стоке 1,2 В, на затворе 0 В). После облучения напряжение на затворе изменялось от -0,5 В до 1,2 В при напряжении на стоке 1,2 В.

4.2.1 Субмикронные МОПТ структуры с «окном» в скрытом оксиде (SELBOX)

Для устранения эффекта плавающей подложки традиционно используют подключение области канала к кремниевой подложке. Однако, такой метод увеличивает пло-

щадь занимаемую транзистором. С другой стороны, для уменьшения эффекта саморазогрева КНИ структур предлагалось использовать взамен традиционного материала скрытого оксида материалы с высокой теплопроводностью, такие как аморфный углерод [161] или тонкие пленки нитрида кремния [162]. Одна из таких конструкций будет рассмотрена в главе 4.2.6. Однако изготовление таких структур является сложной технологической задачей. Фактически, самым простым и наименее затратным способом подавления этих двух эффектов является создание «окна» в скрытом слое под каналом (SELBOX) [163], чтобы скрытый оксид был только под областями истока и стока. Таким образом, дырки, генерируемые ударной ионизацией и теплом, могут легко перемещаться из области канала вглубь подложки. На рисунке 4.36 представлена такая структура.

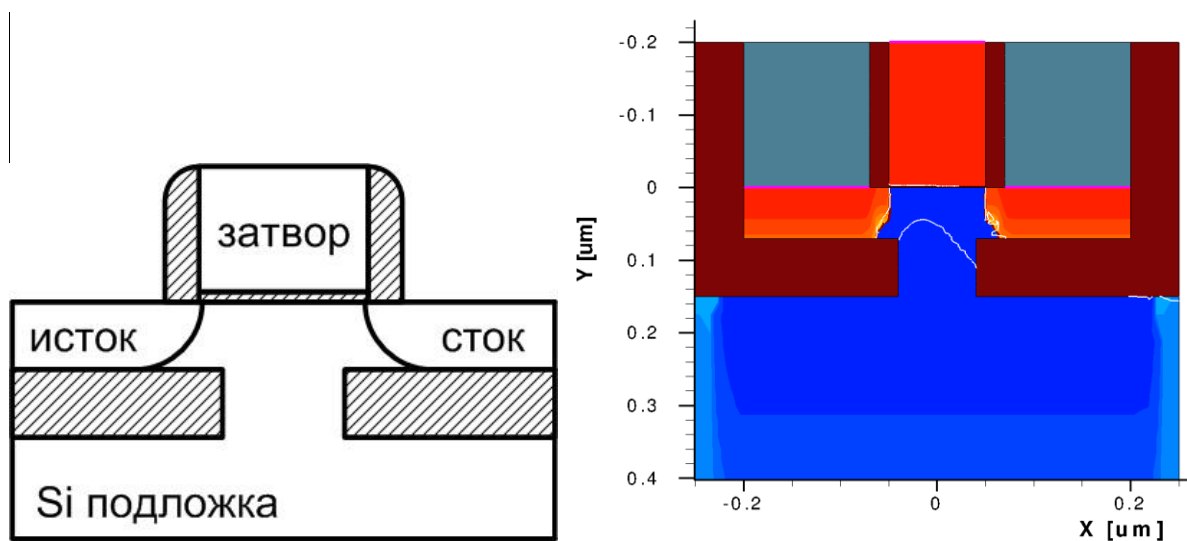


Рис. 4.36. Изображение МОП-структуры с «окном» в скрытом оксиде

Для оценки влияния формы скрытого оксида на температурную и радиационную стойкость МОПТ проводилось два отдельных моделирования, и результаты сравнивались с данными, полученными для стандартной МОП КНИ структуры.

Моделирование эффекта саморазогрева.

На рисунке 4.37 представлено распределение температуры в 100 нм SELBOX структуре для режима работы $U_{СИ}=U_{ЗИ}=2$ В.

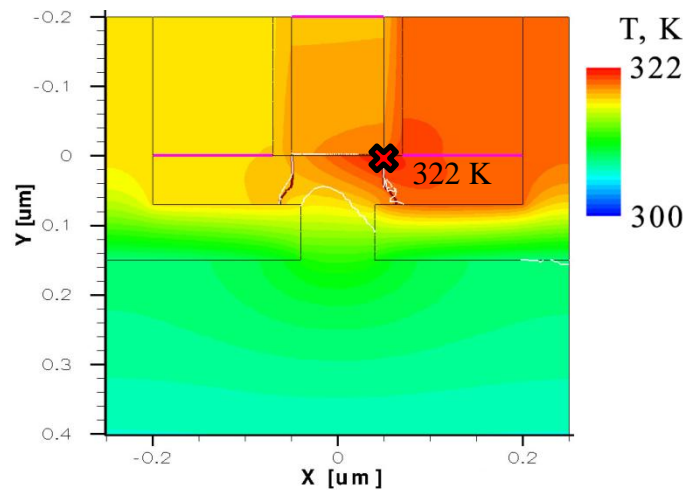


Рис. 4.37. Распределение температуры в 100 нм SELBOX МОП-структуре

Максимальное значение температуры с такой конфигурацией скрытого оксида не превышает 322 К. Это обусловлено частичным отсутствием слоя SiO_2 непосредственно под каналом, что позволяет эффективно отводить температуру внутрь структуры.

Воздействие ионизирующего γ -излучения. На рисунке 4.38 представлены результаты моделирования воздействия ионизирующего излучения с суммарной дозой 300 крад и 600 крад.

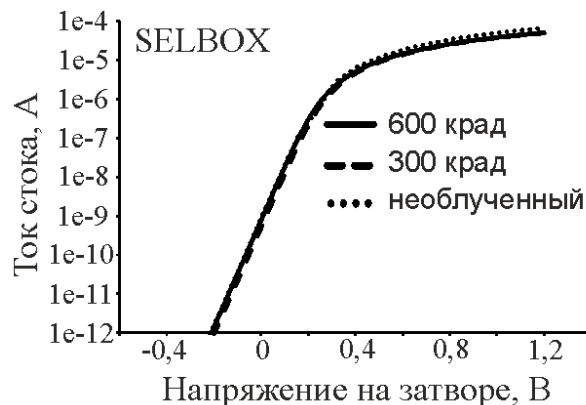


Рис. 4.38. Результаты моделирования воздействия ионизационного излучения на 100 нм SELBOX структуру

В случае КНИ МОП-транзистора с «окном» в скрытом оксиде доля захваченного положительного заряда значительно меньше, так как под область канала почти полностью отсутствует скрытый оксид. По этой причине ток утечки индуцируется только под малой частью области канала и оказывается меньшим по величине, чем аналогичный ток стандартного КНИ МОПТ.

4.2.2 Субмикронные МОПТ структуры с L-образным скрытым оксидом (Quasi-SOI)

В работе [164] предложена конструкция МОПТ с L-образной формой скрытого оксида (рисунок 4.39), в оригинале называемая Quasi-SOI. Область канала напрямую соединена с подложкой, области истока и стока окружены скрытым оксидом L-образной формы. Таким образом, уменьшается эффект короткого канала, улучшается отвод тепла через область канал-подложка и устраняется область протекания тока утечки, обусловленного захваченным радиационно-индуцированным положительным зарядом.

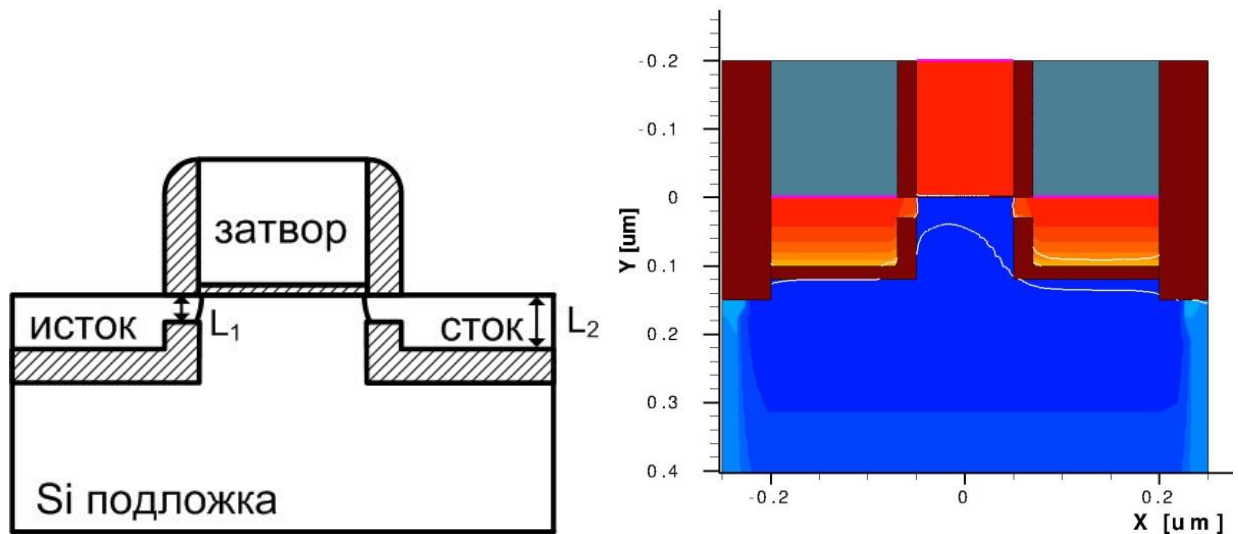


Рис. 4.39. Изображение МОП-структуры с L-образной формой скрытого оксида

Моделировался n-канальный МОП-транзистор с длиной канала 100 нм

Конструкция содержит два симметричных слоя SiO_2 , окружающих области истока и стока снизу и сбоку. Толщина слоя 20 нм. Расстояние от поверхности структуры прибора до L-образного скрытого слоя в LDD-области истока и стока $L_1=30$ нм, в сильнолегированной n^+ -области $L_2=100$ нм.

Приборно-технологическое моделирование осуществлялось с физическими моделями, представленными в таблице 4.9.

Для оценки температурной и радиационной стойкости проводилось два моделирования с такими же режимами, что и в предыдущем случае.

Моделирование эффекта саморазогрева. На рисунке 4.40 представлено распределение температуры в 100 нм quasi-SOI структуре для режима работы $U_{\text{СИ}}=U_{\text{ЗИ}}=2$ В.

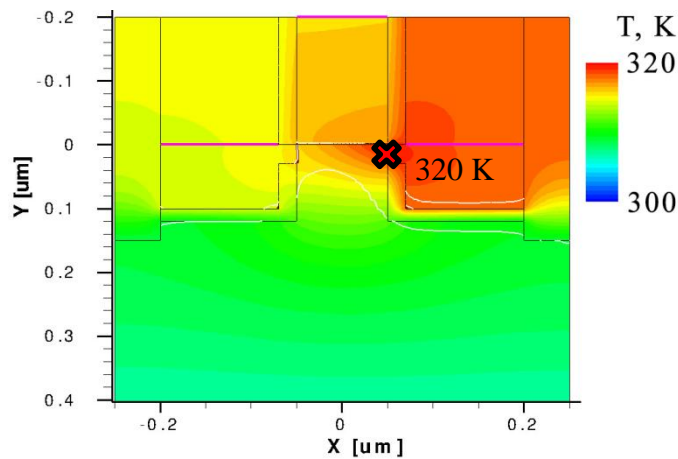


Рис. 4.40. Распределение температуры в 100 нм Quasi-SOI МОП-структуре

Максимальное значение температуры в МОПТ с L-образной конфигурацией скрытого оксида не превышает 320 К. Это обусловлено отсутствием слоя SiO_2 непосредственно под каналом, что позволяет эффективно отводить тепло внутрь структуры.

Для сравнения, значение максимальной температуры для МОПТ на объемном кремнии составляет 316 К, а для стандартного МОПТ КНИ – 348 К.

Воздействие ионизирующего γ -излучения. На рисунке 4.41 представлены результаты моделирования воздействия ионизирующего излучения с суммарной дозой 300 крад и 600 крад.

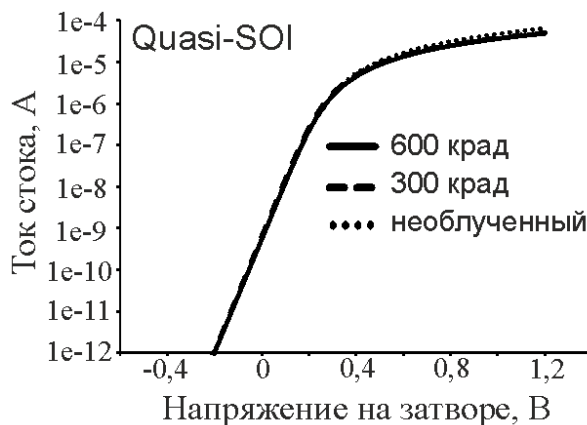


Рис. 4.41. Результаты моделирования воздействия ионизационного излучения на 100 нм Quasi-SOI структуру

Доля захваченного положительного заряда в L-образных слоях SiO_2 , мала из-за малой толщины этих областей. Отсутствие слоя SiO_2 под областью канала не позволяет возникнуть радиационно-индуцированному току утечки вдоль активной области.

4.2.3 Субмикронные МОПТ структуры с частично скрытым оксидом (partial SOI)

В силовой электронике применяются мощные КНИ МОП-транзисторы с областью боковой диффузии (LDMOS). По аналогии, одной из разновидностей таких МОП-транзисторов для микромощных применений являются транзисторы со скрытом слоем SiO_2 , частично изолирующим активную структуру прибора (в оригинале – partial SOI) (рисунок 4.42) [149]. Как видно из рисунка, скрытый оксид находится только под областью стока и частично под областью канала. Таким образом, в таких транзисторах улучшается отвод тепла из активной области и уменьшается объем слоя SiO_2 для захвата положительного заряда.

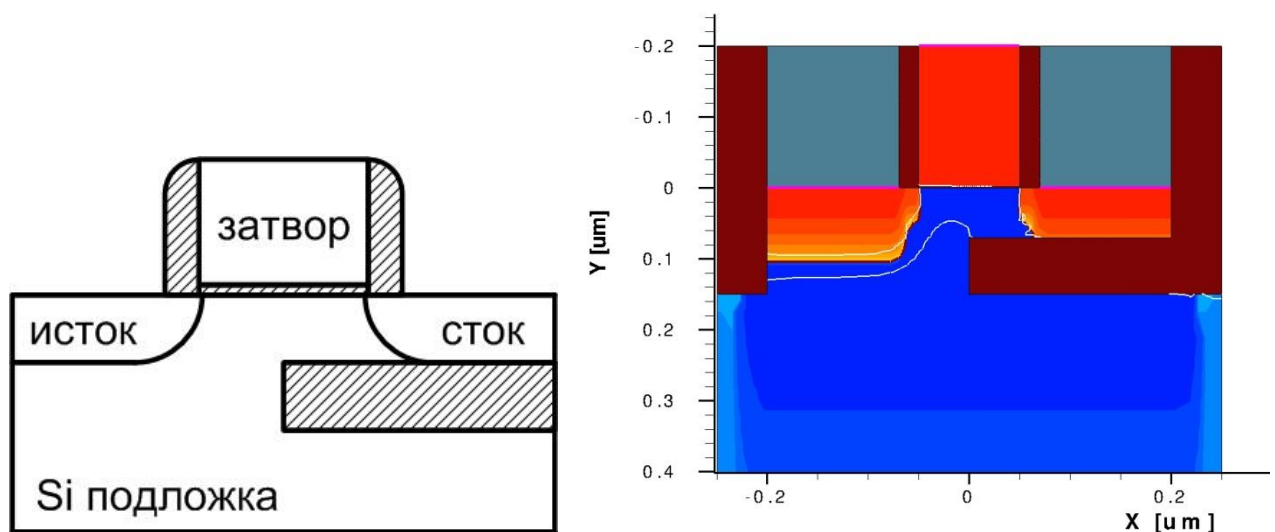


Рис. 4.42. Изображение МОП-структуры с частично скрытым оксидом

Моделировался n-канальный МОП-транзистор с длиной канала 100 нм. Геометрические размеры областей и уровни легирования такие же, как у предыдущих структур.

Конструкция с частично скрытым слоем SiO_2 отличается от стандартной конструкции МОПТ КНИ отсутствием слоя SiO_2 от левого края структуры (область истока) до середины канала.

Приборно-технологическое моделирование осуществлялось с физическими моделями, представленными в таблице 4.9.

Для оценки температурной и радиационной стойкости проводилось два моделирования с такими же режимами, что и в предыдущих случаях.

Моделирование эффекта саморазогрева. На рисунке 4.43 представлено распределение температуры в 100 нм partial SOI структуре для режима работы $U_{СИ}=U_{ЗИ}=2$ В.

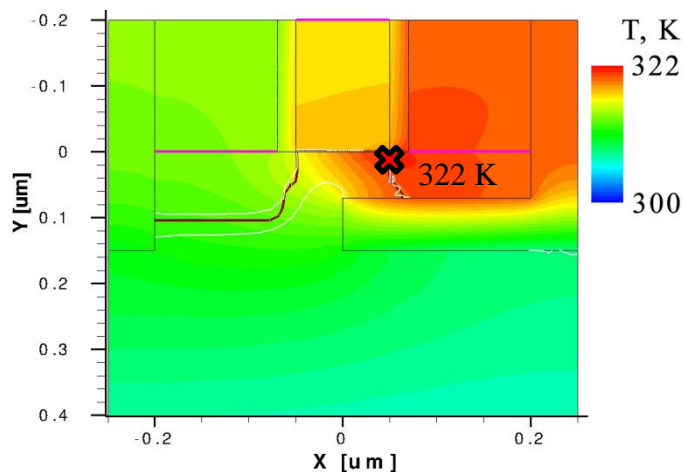


Рис. 4.43. Распределение температуры в 100 нм Partial SOI МОП-структуре

Максимальное значение температуры в МОПТ структуре с такой конфигурацией скрытого оксида не превышает 322 К. Это обусловлено частичным отсутствием слоя SiO_2 непосредственно под каналом, что позволяет эффективно отводить тепло вглубь кремниевой подложки.

Воздействие ионизирующего γ -излучения. На рисунке 4.44 представлены результаты моделирования воздействия ионизирующего излучения суммарной дозой 300 крад и 600 крад.

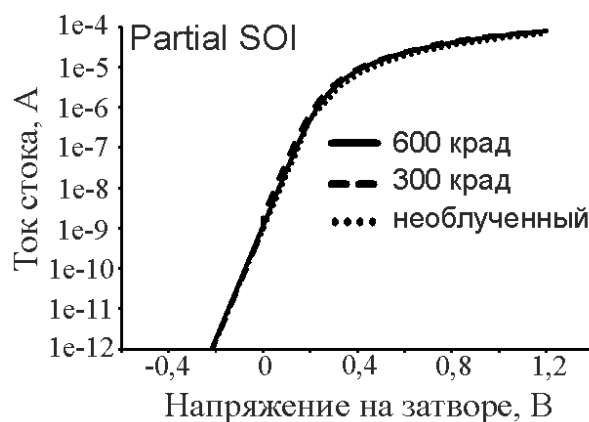


Рис. 4.44. Результаты моделирования воздействия ионизационного излучения на 100 нм Partial SOI структуру

В случае КНИ МОП-транзистора с частично скрытым оксидом доля захваченного положительного заряда значительно меньше, так как длина скрытого оксида в два раза меньше, чем для случая со стандартной КНИ подложкой. По этой причине ток утечки индуцируется только под частью области канала и оказывается меньшим по величине, чем аналогичный ток стандартного КНИ МОПТ.

4.2.4 Субмикронные МОПТ структуры с тонким скрытым оксидом (thin-BOX SOI)

Из всех рассматриваемых в настоящем параграфе конструкций КНИ МОПТ, приборы со структурой thin-BOX технологически наиболее освоены и нашли широкое применение в практических разработках субмикронных и глубоко субмикронных СБИС [165], [166].

На рисунке 4.45 представлена МОПТ структура с тонким скрытым оксидом (thin-BOX) [151]. Тонкий скрытый оксид позволяет подавить краевые электрические поля, улучшая подпороговый наклон и уменьшая влияние DIBL эффекта. К сожалению, недостатком thin-BOX структур является усиленная связь активной области с подложкой. Такая связь может ухудшить как статические, так и частотные характеристики таких транзисторов.

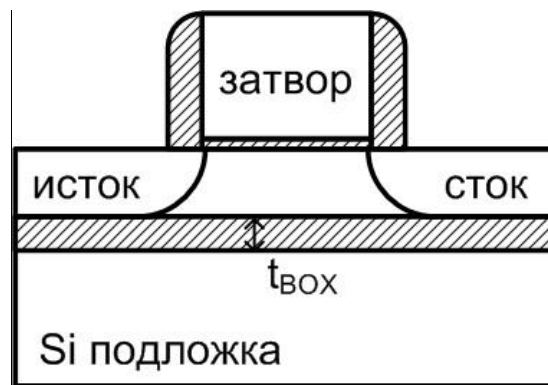


Рис. 4.45. Изображение МОП-структуры с тонким скрытым оксидом

Проведено моделирование трех thin-BOX структур n-канального МОП-транзистора (рисунок 4.50) с длиной канала 100 нм. Геометрические размеры областей и уровни легирования такие же, как у предыдущих структур.

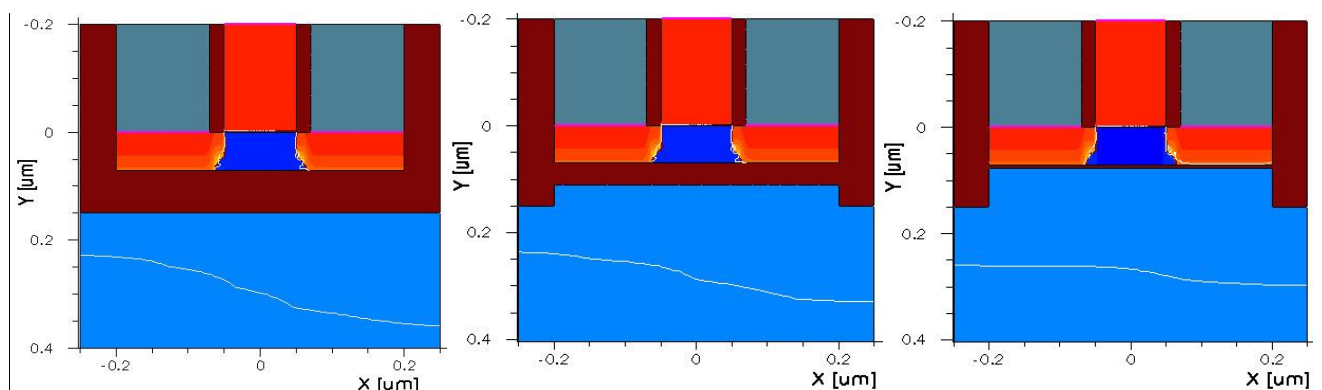


Рис. 4.46. TCAD изображения thin-BOX структур с толщиной скрытого слоя SiO₂ 80 нм,

40 нм и 6 нм

Рассмотрены структуры со следующими размерами t_{BOX} : 80 нм, 40 нм и 6 нм [144].

Приборно-технологическое моделирование осуществлялось с физическими моделями, представленными в таблице 4.9.

Для оценки температурной и радиационной стойкости проводилось два отдельных моделирования с такими же режимами, что и в предыдущих случаях.

Моделирование эффекта саморазогрева. На рисунке 4.47 представлено распределение температуры в 100 нм thin-BOX структурах для режима работы $U_{\text{СИ}}=U_{\text{ЗИ}}=2$ В.

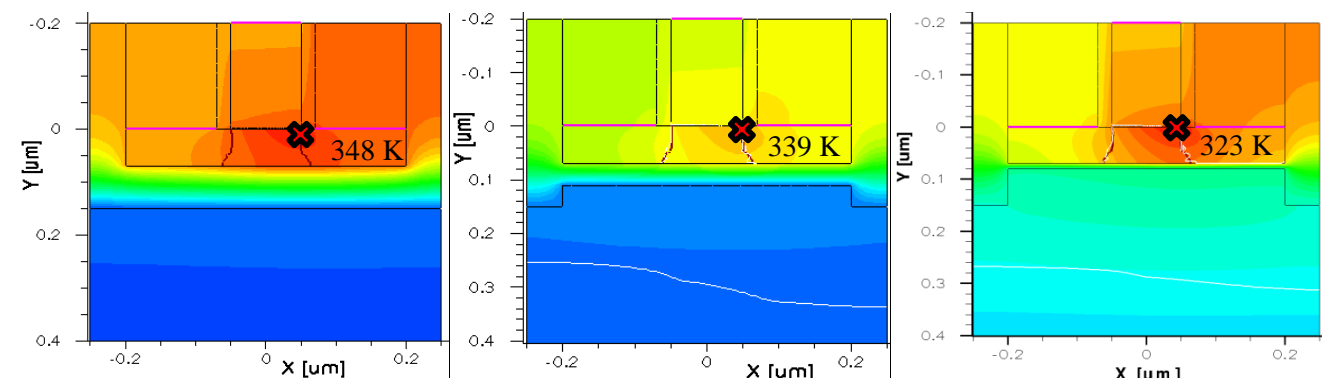


Рис. 4.47. Сравнение распределения температуры в 100 нм thin-BOX структурах с толщиной слоя SiO_2 80 нм, 40 нм и 6 нм

Максимальное значение температуры в конфигурации с полным слоем SiO_2 составляет 348 К, для 50% (40 нм) от исходной толщины – 339 К и для 8% (6 нм) от исходной толщины 323 К. Это обусловлено более интенсивным отводом тепла через более тонкий изолирующий слой SiO_2 .

Воздействие ионизирующего γ -излучения. На рисунке 4.48 представлены результаты моделирования воздействия ионизирующего излучения с суммарной дозой 300 крад и 600 крад.

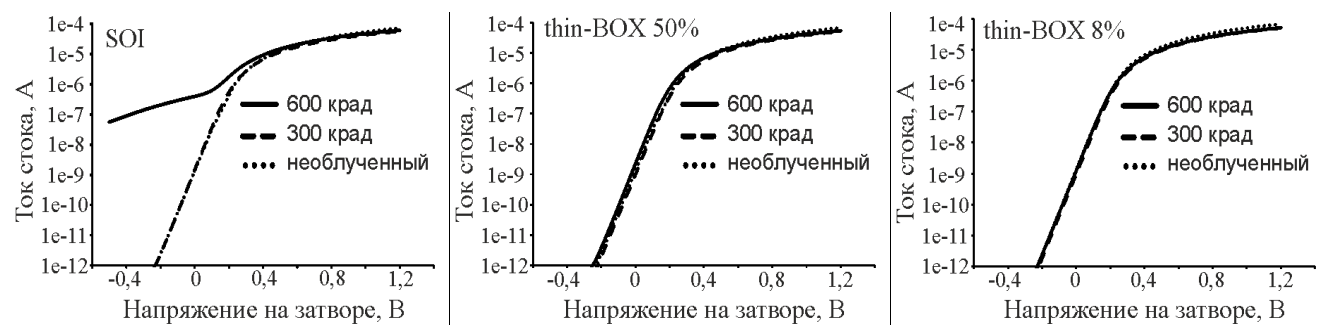


Рис. 4.48. Результаты моделирования воздействия ионизирующего излучения на различные варианты 100 нм thin-BOX структуры

Видно, что при дозе $D=300$ крад стандартная и thin-BOX МОПТ структуры практически нечувствительны к радиационному воздействию.

При воздействии γ -излучения с дозой $D=600$ крад в thin-BOX структурах с меньшими толщинами скрытого оксид ток утечки (таблица 4.10) заметно меньше, так как в тонком слое оксида доля захваченного положительного заряда значительно меньше.

Таблица 4.10. Сравнение токов утечки после воздействия ионизационного облучения для SOI и thin-BOX МОП-транзисторов при $U_{зи}=0$ В, $U_{си}=1,2$ В.

Доза гамма излучения	$I_{утечки}$ мА/мкм		
	SOI	thin-BOX 50%	thin- BOX 8%
Необлученный	2E-09	1E-09	1E-09
300 крад	2E-09	1E-09	1E-09
600 крад	2E-07	2E-09	1E-09

4.2.5 Субмикронные МОПТ структуры со сверхтонким скрытым оксидом и тонким активным слоем (UTBV)

На рисунке 4.49 представлена МОПТ структура со сверхтонким скрытым оксидом и тонким активным слоем (Ultra Thin Body and BOX – UTBV) [167]. UTBV структуры рассматриваются как одни из наиболее перспективных кандидатов для масштабирования МОП-транзисторов, благодаря их невосприимчивости к короткоканальным эффектам. Также стоит отметить наличие «поднятых» областей истока и стока, через которые обеспечивается отвод тепла из рабочей области.

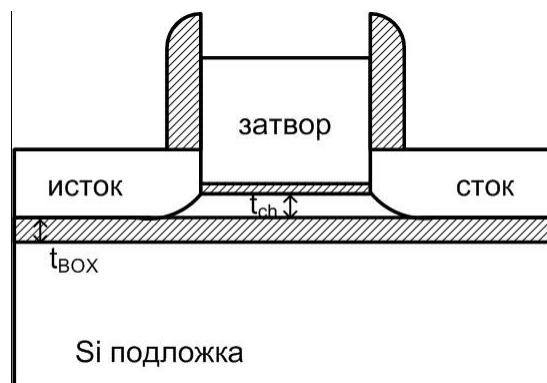


Рис. 4.49. Изображение МОП-структуры со сверхтонким скрытым оксидом и тонким активным слоем

Проведено моделирование трех UTBV структур n-канального МОП-транзистора (рисунок 4.50) с длиной канала 100 нм. Геометрические размеры областей и уровни легирования такие же, как у предыдущих структур.

UTBV конструкция отличается от стандартной конструкции КНИ МОПТ меньшей толщиной скрытого слоя SiO_2 (t_{BOX}) и активного слоя под затвором (t_{ch}). Рассмотрены структуры со следующими размерами $t_{\text{BOX}}/t_{\text{ch}}$: 80/70 нм, 40/50 нм и 6/25 нм [144].

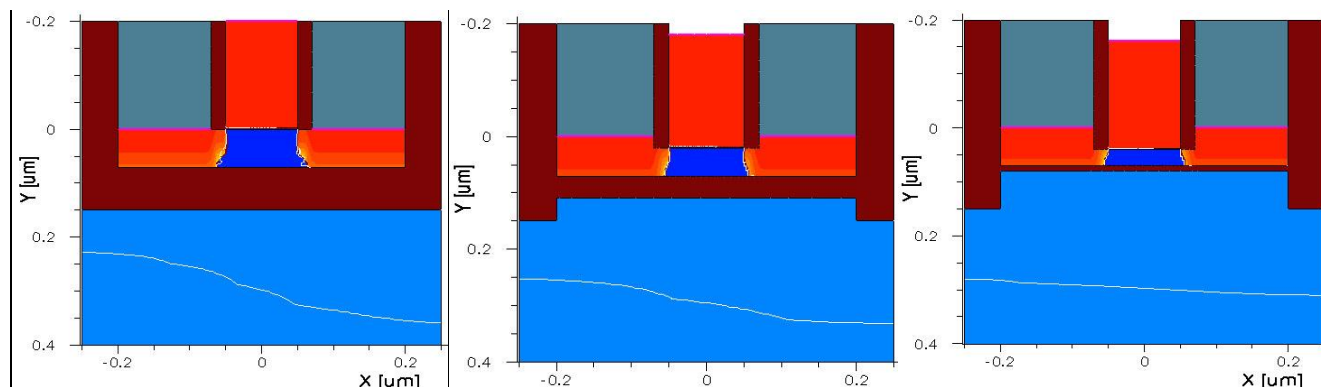


Рис. 4.50. TCAD изображения UTBV структур со следующими размерами $t_{\text{BOX}}/t_{\text{ch}}$: 80/70 нм, 40/50 нм и 6/25 нм

Приборно-технологическое моделирование осуществлялось с физическими моделями, представленными в таблице 4.9.

Для оценки температурной и радиационной стойкости проводилось два отдельных моделирования с такими же режимами, что и в предыдущих случаях.

Моделирование эффекта саморазогрева. На рисунке 4.51 представлено распределение температуры в 100 нм UTBV структурах для режима работы $U_{\text{СИ}}=U_{\text{ЗИ}}=2$ В.

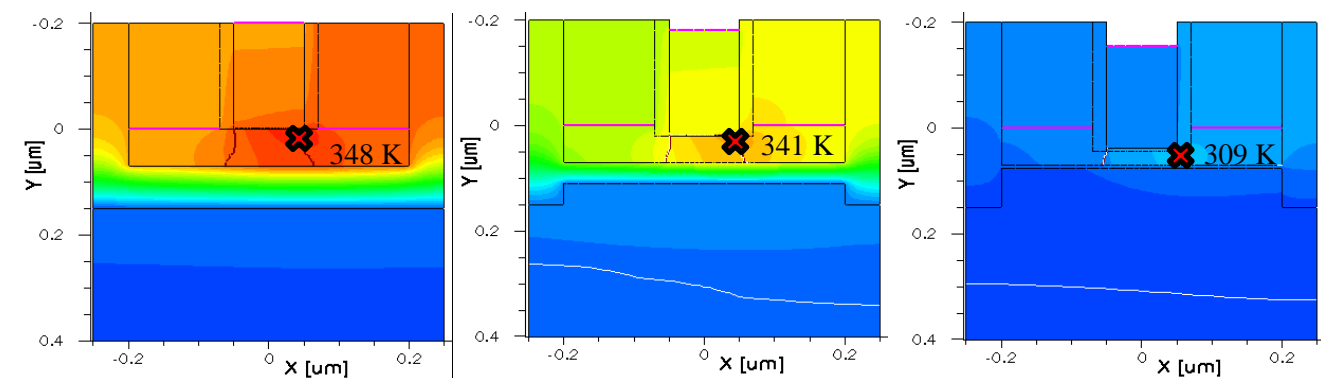


Рис. 4.51. Сравнение распределения температуры в 100 нм UTBV структурах со следующими размерами $t_{\text{BOX}}/t_{\text{ch}}$: 80/70 нм, 40/50 нм и 6/25 нм

Максимальное значение температуры в конфигурации с полным слоем SiO_2 составляет 348 К, для 50% от исходной толщины – 341 К и для 8% от исходной толщины

309 К. Это обусловлено более быстрым отводом тепла, во-первых, через меньший по величине изолирующий слой и, во-вторых, через «поднятые» области истока и стока.

Приведенные на рисунке 4.51 результаты моделирования эффекта «саморазогрева» в UTBV структуре хорошо согласуются с результатами экспериментальной работы [144], полученными для аналогичной структуры UTBV MOSFET.

Сравнивая результаты с аналогичными результатами для структуры thin-BOX на рисунке 4.47, следует отметить, что для конструкций со сверхтонким $t_{\text{BOX}}=6$ нм, в структуре UTBV максимальная температура саморазогрева составляет $T_{\text{макс}}=309$ К, что меньше, чем в структуре thin-BOX ($T_{\text{макс}}=323$ К). Это обусловлено лучшими условиями отвода тепла через верхнюю часть структуры с «поднятыми» областями истока и стока.

Воздействие ионизирующего γ -излучения. На рисунке 4.52 представлены результаты моделирования воздействия ионизирующего излучения с суммарной дозой 300 крад и 600 крад.

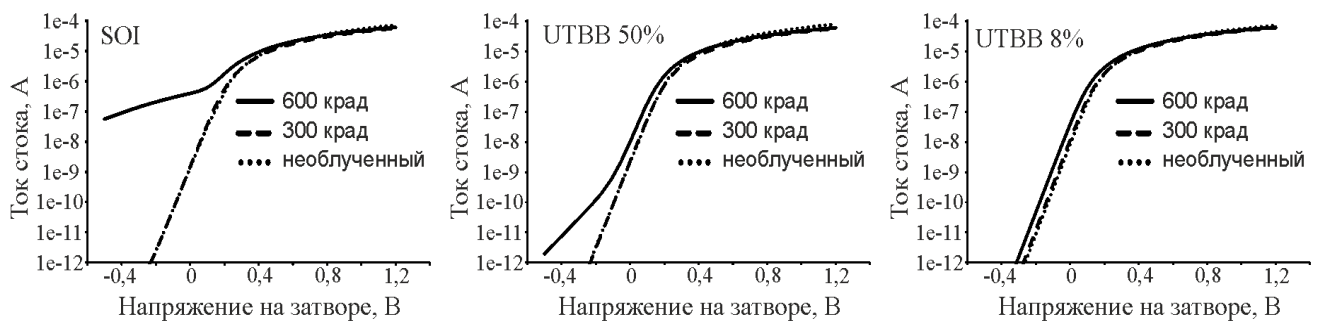


Рис. 4.52. Результаты моделирования воздействия ионизирующего излучения на различные варианты 100 нм UTBV структуры со следующими размерами $t_{\text{BOX}}/t_{\text{ch}}$: 80/70 нм, 40/50 нм и 6/25 нм

При воздействии дозы 600 крад в структурах с меньшими размерами $t_{\text{BOX}}/t_{\text{ch}}$ ток утечки (Таблица 4.11) заметно меньше, так как в тонком слое скрытого оксида доля захваченного положительного заряда значительно меньше.

Однако ток утечки в структуре UTBV по сравнению со структурой thin-BOX примерно на порядок величины больше.

Таблица 4.11. Сравнение токов утечки после воздействия ионизационного облучения для SOI и UTBB МОП-транзисторов при $U_{зи}=0$ В, $U_{си}=1,2$ В.

Доза гамма излучения	$I_{утечки}$ мА/мкм		
	SOI	UTBB 50%	UTBB 8%
Необлученный	2E-09	2E-09	8E-09
300 крад	2E-09	2E-09	1E-08
600 крад	2E-07	1E-08	4E-08

4.2.6 МОПТ со скрытым оксидом алюминия (Alumina)

Для уменьшения эффекта саморазогрева КНИ структур предлагалось использовать взамен традиционного материала скрытого оксида материалы с высокой теплопроводностью. Одним из таких материалов является оксид алюминия [152] с $\lambda_{Alumina}=20$ Вт/м·К. По сравнению с традиционным материалом ($\lambda_{SiO_2}=1,4$ Вт/м·К) оксид алюминия эффективней отводит тепло внутрь структуры за счет на порядок большего коэффициента теплопроводности. На рисунке 4.53 представлена такая структура.

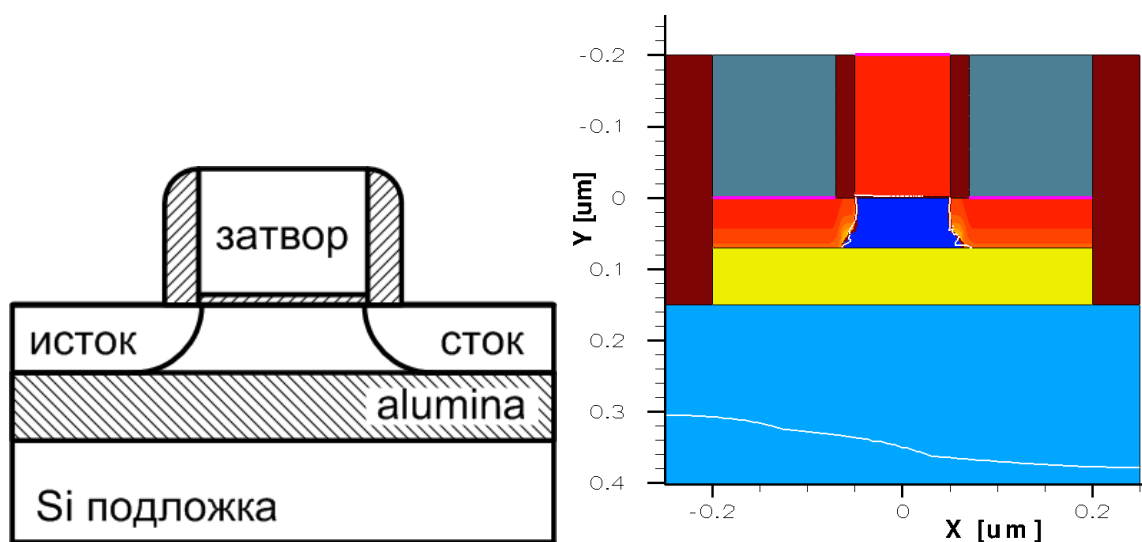


Рис. 4.53. Изображение МОП-структуры со скрытым оксидом на основе оксида алюминия (Alumina)

Моделировался n-канальный МОП-транзистор с длиной канала 100 нм. Геометрические размеры областей и уровни легирования такие же, как у предыдущей структуры.

Приборно-технологическое моделирование осуществлялось с физическими моделями, представленными в таблице 4.9.

Для оценки температурной стойкости проводилось моделирование с такими же режимами, что и в предыдущем случае.

Моделирование эффекта саморазогрева. На рисунке 4.54 представлено распределение температуры в 100 нм структуре со скрытым оксидом из Al_2O_3 для режима работы $U_{\text{СИ}}=U_{\text{ЗИ}}=2$ В.

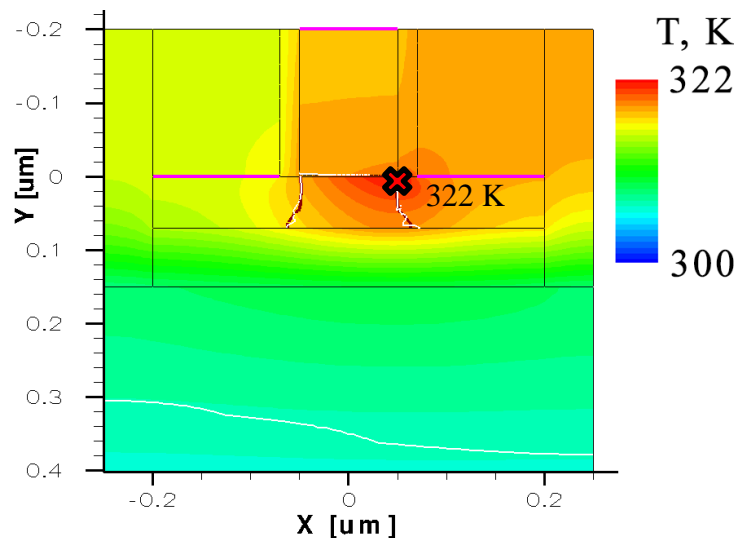


Рис. 4.54. Распределение температуры в 100 нм структуре со скрытым оксидом из оксида алюминия (Alumina)

Максимальное значение температуры с такой конфигурацией скрытого оксида не превышает 322 К. Это обусловлено более высоким значением коэффициента теплопроводности оксида алюминия по сравнению с оксидом кремния.

Воздействие ионизирующего γ -излучения. Радиационная стойкость Alumina в основном исследована на примере воздействия нейтронов [168], [169]. Воздействия ионизирующего излучения с дозами до нескольких мега рад описаны в работе [170], заметной деградации характеристик при таких дозах не наблюдается. Таким образом, можно сделать вывод, что КНИ МОПТ структуры со скрытым оксидом из Alumina являются радиационно-стойкими.

4.2.7 МОПТ со скрытым слоем на основе нитрида алюминия (AlN)

Следующим материалом с высокой теплопроводностью является нитрид алюминия (AlN) [153] с $\lambda_{\text{AlN}}=136$ Вт/м·К. Его коэффициент теплопроводности почти сравним с

теплопроводностью кремния $\lambda_{Si}=140$ Вт/м·К. Поэтому структуры с нитридом алюминия в качестве скрытого оксида могут быть использованы как для стандартного применения, так и для высокотемпературной электроники. На рисунке 4.55 представлена такая структура.

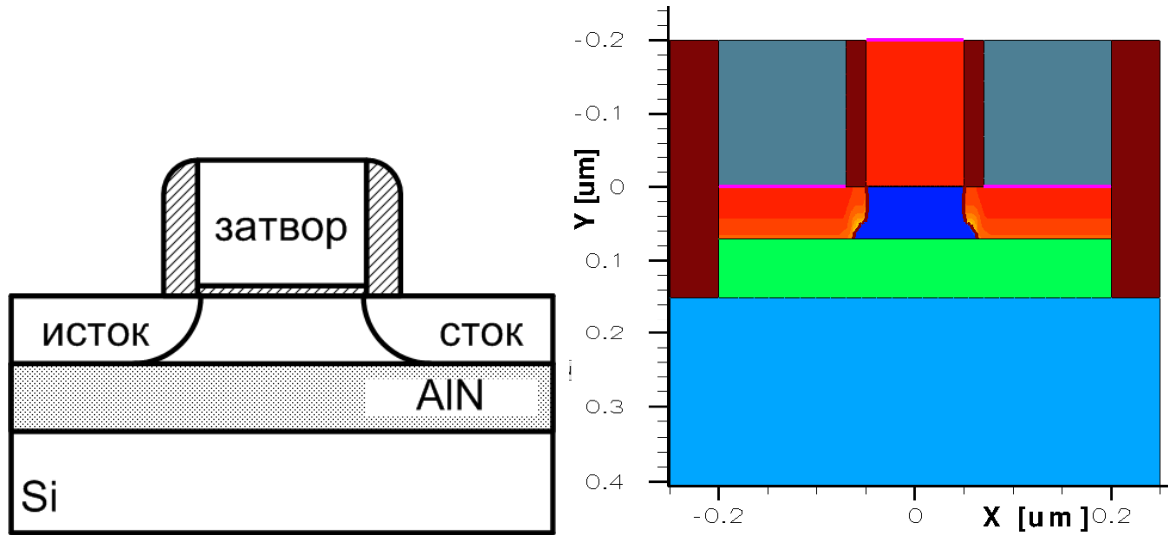


Рис. 4.55. Изображение МОП-структуры со скрытым слоем на основе нитрида алюминия

Моделировался p-канальный МОП-транзистор с длиной канала 100 нм. Геометрические размеры областей и уровни легирования такие же, как у предыдущих структур.

Приборно-технологическое моделирование осуществлялось с физическими моделями, представленными в таблице 4.9.

Для оценки температурной стойкости проводилось моделирование с такими же режимами, что и в предыдущих случаях.

Моделирование эффекта саморазогрева. На рисунке 4.56 представлено распределение температуры в 100 нм структуре со скрытым оксидом из AlN для режима работы $U_{СИ}=U_{ЗИ}=2$ В.

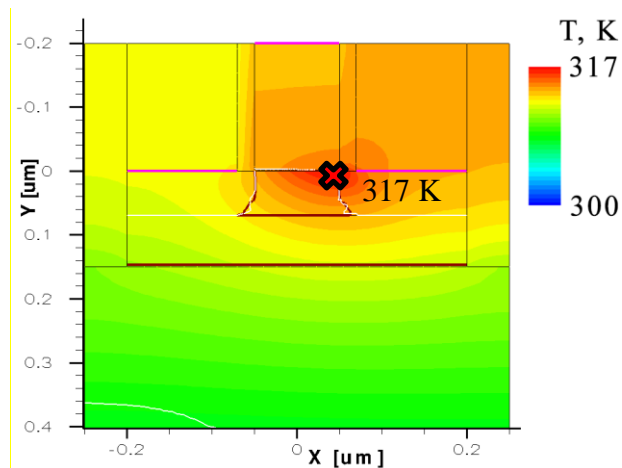


Рис. 4.56. Распределение температуры в 100 нм SOI МОП-структуре со скрытым оксидом из AlN

Максимальное значение температуры с такой конфигурацией скрытого оксида не превышает 317 К. Это обусловлено более высоким значением коэффициента теплопроводности нитрида алюминия по сравнению с оксидом кремния (примерно в 100 раз).

Воздействие ионизирующего γ -излучения. В ходе ряда исследований авторами работ [171], [172] было установлено, что нитрид алюминия обладает высокой радиационной стойкостью, в том числе к ионизационным видам воздействия. Таким образом, можно сделать вывод, что КНИ МОПТ структуры со скрытым оксидом из нитрида алюминия являются радиационно-стойкими.

4.2.8 МОПТ со скрытым оксидом на основе нитрида кремния (Si_3N_4)

Нитрид кремния (Si_3N_4) является широко применяемым изолятором в микроэлектронике и его также рассматривают как материал для скрытого оксида. Коэффициент теплопроводности нитрида кремния $\lambda_{\text{Si}_3\text{N}_4}=30$ Вт/м·К, что примерно в 20 раз больше, чем у оксида кремния. На рисунке 4.57 представлена структура со скрытым оксидом из нитрида кремния.

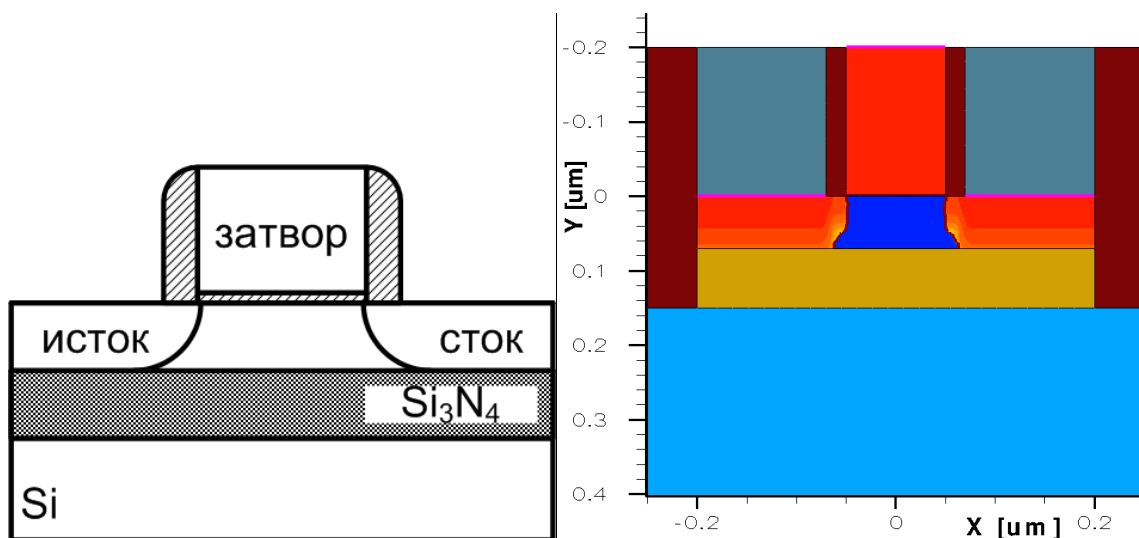


Рис. 4.57. Изображение МОП-структуры со скрытым оксидом на основе нитрида кремния

Моделировался n-канальный МОП-транзистор с длиной канала 100 нм. Геометрические размеры областей и уровни легирования такие же, как у предыдущих структур.

Приборно-технологическое моделирование осуществлялось с физическими моделями, представленными в таблице 4.9.

Для оценки температурной стойкости проводилось моделирование с такими же режимами, что и в предыдущих случаях.

Моделирование эффекта саморазогрева. На рисунке 4.58 представлено распределение температуры в 100 нм структуре со скрытым оксидом из Si_3N_4 для режима работы $U_{\text{СИ}}=U_{\text{ЗИ}}=2$ В.

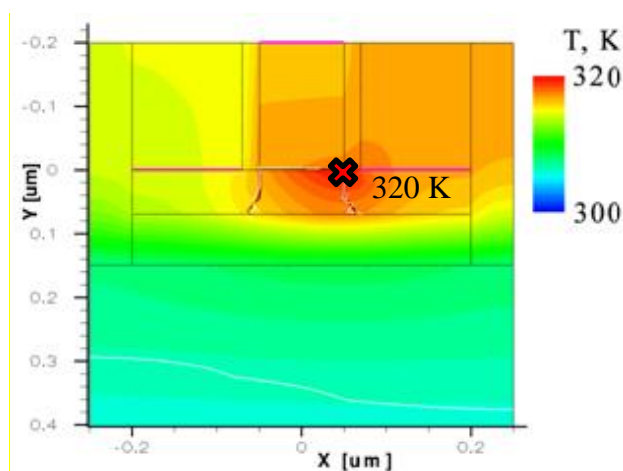


Рис. 4.58. Распределение температуры в 100 нм структуре со скрытым оксидом из Si_3N_4

Максимальное значение температуры с такой конфигурацией скрытого оксида не превышает 320 К. Это обусловлено более высоким значением коэффициента теплопроводности нитрида алюминия по сравнению с оксидом кремния.

Воздействие ионизирующего γ -излучения. Последние исследования [173] показывают, что нитрид кремния чувствителен к воздействию радиации, особенно при использовании в спейсерах затвора. Однако, количество накапливаемого заряда на три порядка меньше по сравнению со стандартным оксидом кремния [174]. Таким образом, можно сделать вывод, что КНИ МОПТ структуры со скрытым оксидом из нитрида кремния являются радиационно-стойкими.

4.2.9 МОПТ с дополнительным диэлектриком с высокой теплопроводностью (high-TCI), окружающим скрытый SiO_2 слой

Другой способ уменьшения температуры внутри структуры был предложен в работе [115]. Авторы предлагают создать два канала для отвода тепла от областей истока и стока в подложку через диэлектрик с высокой теплопроводностью, к примеру, нитрид алюминия (AlN). Диэлектрики размещаются слева и справа от областей стока и истока, соответственно. Нитрид алюминия выбран, так как его коэффициент теплопроводности ($\lambda_{\text{AlN}}=200 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) примерно в 150 раз больше, чем коэффициент теплопроводности оксида кремния ($\lambda_{\text{SiO}_2}=1,4 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$). На рисунке 4.59 представлена такая структура.

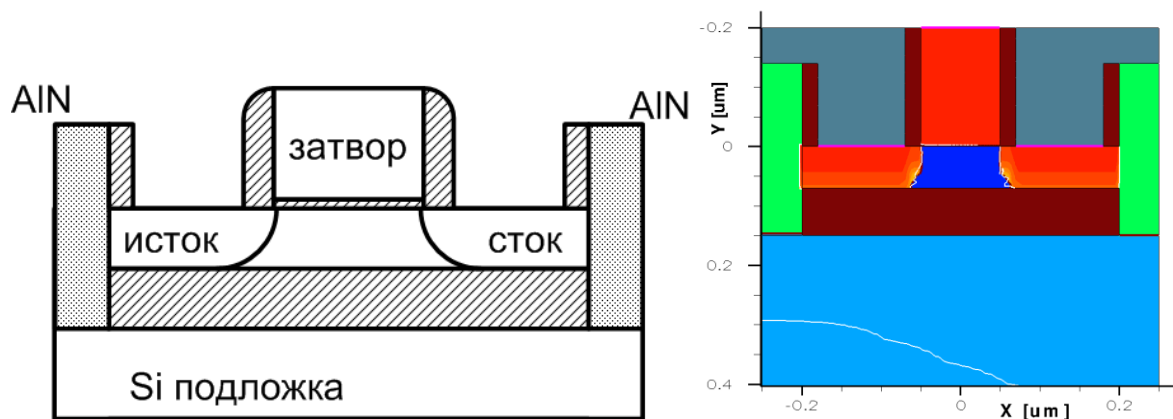


Рис. 4.59. Изображение МОП-структуры с дополнительным диэлектриком высокой теплопроводности (AlN)

Моделировался n-канальный МОП-транзистор с длиной канала 100 нм. Геометрические размеры областей и уровни легирования такие же, как у предыдущей структуры.

Приборно-технологическое моделирование осуществлялось с физическими моделями, представленными в таблице 4.9.

Для оценки температурной и радиационной стойкости проводилось два моделирования с такими же режимами, что и в предыдущем случае.

Моделирование эффекта саморазогрева. На рисунке 4.60 представлено распределение температуры в 100 нм структуре с дополнительным диэлектриком высокой теплопроводности для режима работы $U_{\text{си}}=U_{\text{зи}}=2$ В.

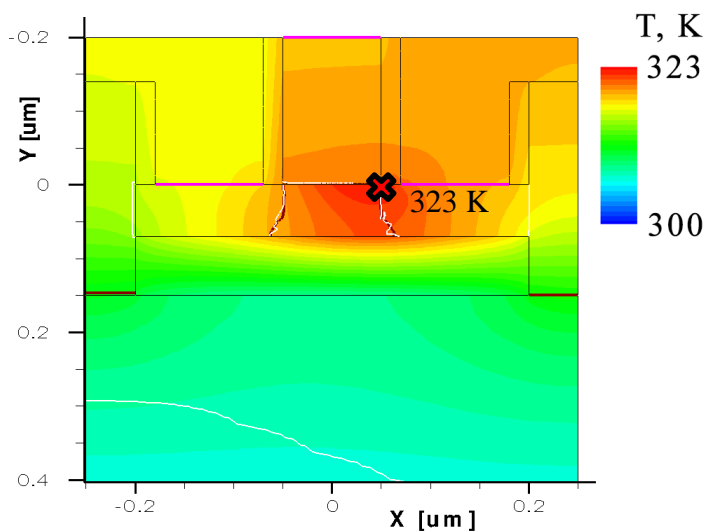


Рис. 4.60. Распределение температуры в 100 нм структуре с дополнительным диэлектриком высокой теплопроводности (AlN)

Максимальное значение температуры с такой конфигурацией скрытого оксида не превышает 323 К. Это обусловлено наличием дополнительных каналов для отвода тепла через боковые области из AlN.

Воздействие ионизирующего γ -излучения. На рисунке 4.61 представлены результаты моделирования воздействия ионизирующего излучения с суммарной дозой 300 крад и 600 крад.

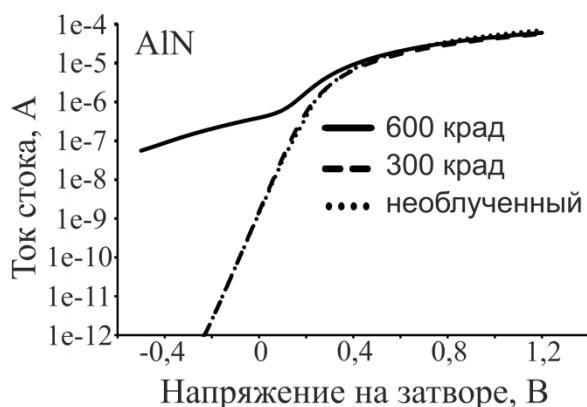


Рис. 4.61. Результаты моделирования воздействия ионизационного излучения на 100 нм структуру с дополнительным диэлектриком высокой теплопроводности (AlN)

В случае структуры с дополнительными теплоотводящими каналами наблюдается заметная деградация характеристик при дозе более 600 крад, так как с точки зрения радиационной стойкости области канала данная конфигурация идентична традиционной

КНИ, две вставки из AlN, во-первых, находятся на удалении от канала, и, во-вторых, обладают довольно большой стойкостью к воздействию ионизирующего излучения.

4.2.10 МОПТ с дополнительным слоем кремния в скрытом оксиде (Double SOI)

В работе [112] авторы предложили конструкцию с дополнительным слоем кремния в объеме скрытого слоя. Такой слой предлагается использовать в качестве независимого электрода для управления внутренним электрическим полем верхнего скрытого слоя (BOX1). Необходимо отметить, что толщина верхнего скрытого слоя BOX1 меньше, чем толщина исходного слоя скрытого оксида, таким образом, количество захваченного заряда и, соответственно, ток утечки по нижней грани будут меньше. Таким образом, такая конфигурация МОПТ структуры обладает более высокой радиационной стойкостью по сравнению с традиционной КНИ структурой. На рисунке 4.62 представлена такая структура.

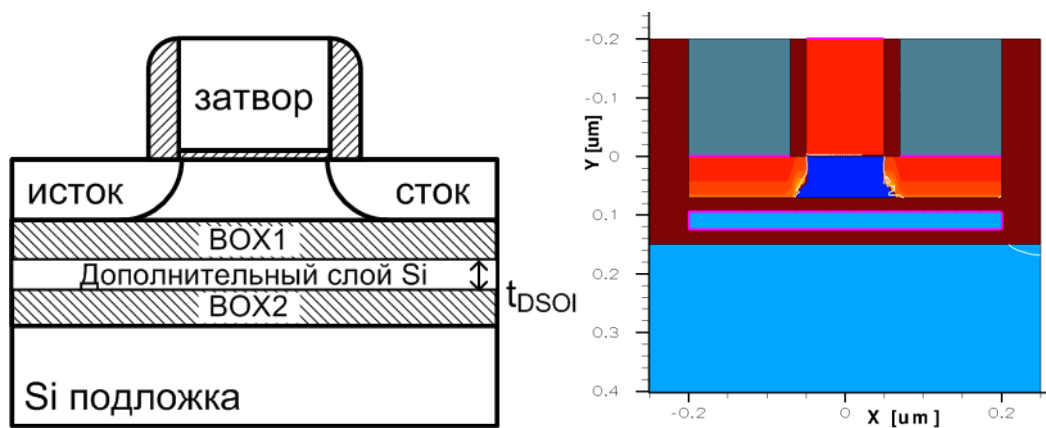


Рис. 4.62. Изображение МОП-структуры с дополнительным слоем кремния в скрытом оксиде (Double SOI)

Моделировался n-канальный МОП-транзистор с длиной канала 100 нм. Геометрические размеры областей и уровни легирования такие же, как у предыдущей структуры. Толщина дополнительного слоя кремния $t_{DSOI} = 40$ нм. Толщины верхнего и нижнего скрытых оксидов одинакова и равна 40 нм.

Приборно-технологическое моделирование осуществлялось с физическими моделями, представленными в таблице 4.9.

Для оценки температурной и радиационной стойкости проводилось два моделирования с такими же режимами для электрода затвора, стока и истока, что и в предыду-

щем случае. Напряжение на дополнительном слое кремния (U_{SiO_2}) менялось от 0 В до -30 В.

Моделирование эффекта саморазогрева. На рисунке 4.63 представлено распределение температуры в 100 нм структуре слоем кремния в скрытом оксиде для режима работы $U_{\text{СИ}}=U_{\text{ЗИ}}=2$ В и $U_{\text{SiO}_2}=0$ В.

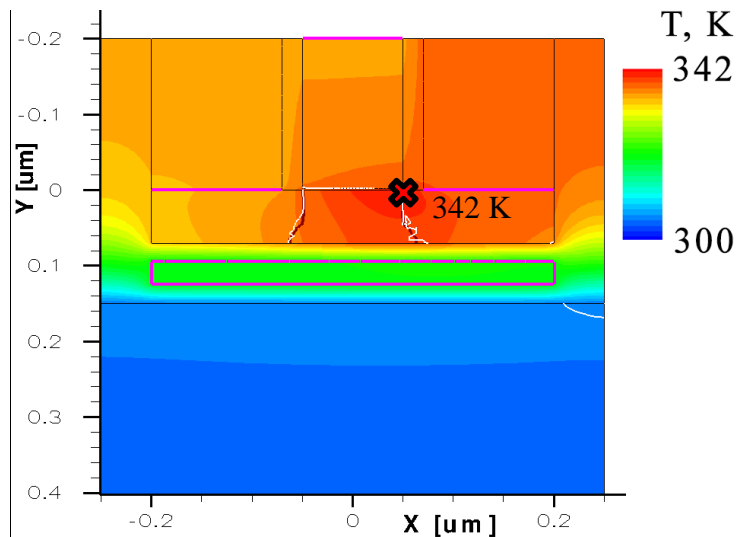


Рис. 4.63. Распределение температуры в 100 нм структуре с дополнительным слоем кремния в скрытом оксиде, напряжение на дополнительном слое отсутствует

Максимальное значение температуры с такой конфигурацией скрытого оксида не превышает 342 К. Уменьшение максимальной температуры по сравнению с традиционной конфигурацией обусловлено более эффективным отводом тепла через область скрытого оксида за счет наличия в области слоя с более высокой теплопроводностью.

Воздействие ионизирующего γ -излучения. На рисунке 4.64 представлены результаты моделирования воздействия ионизирующего излучения с суммарной дозой 300 крад и 600 крад при отсутствии напряжения на дополнительном слое. На рисунке 4.65 результаты моделирования тех же характеристик при изменении напряжения на дополнительном слое кремния U_{SiO_2} от 0 В до -30 В.

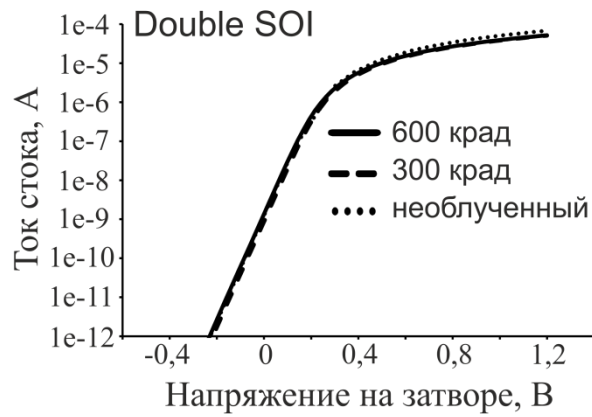


Рис. 4.64. Результаты моделирования воздействия ионизационного излучения на 100 нм структуру с дополнительным слоем кремния в скрытом оксиде (Double SOI), напряжение на дополнительном слое отсутствует

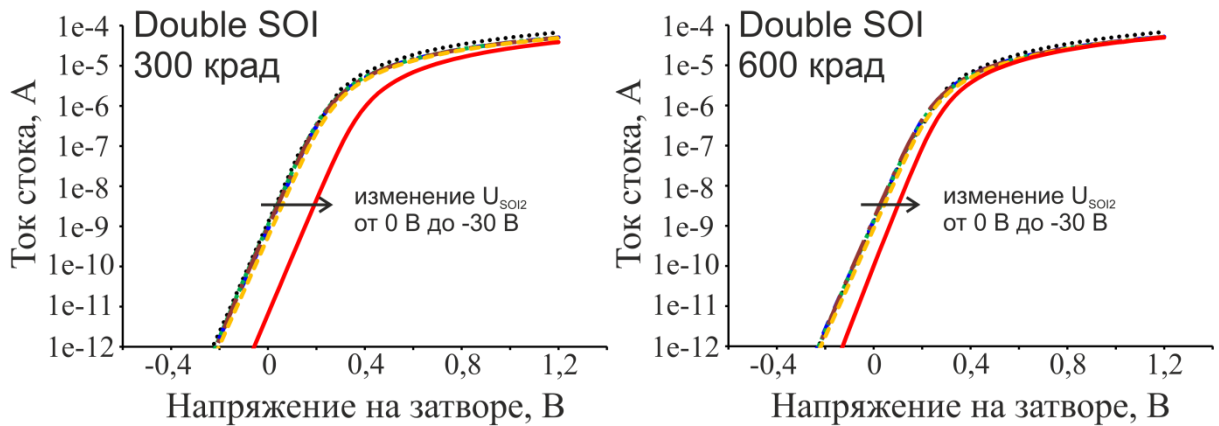


Рис. 4.65. Результаты моделирования воздействия ионизационного излучения на 100 нм структуру с дополнительным слоем кремния в скрытом оксиде (Double SOI), при напряжении на дополнительном слое 0 В, -1 В, -5 В, -10 В, -30 В

В рассматриваемой структуре ток утечки по нижней грани образуется по границе с BOX1, толщина которого в два раза меньше исходного, следовательно, при меньшей толщине в объеме скрытого оксида накапливается меньший захваченный заряд. В случае изменения напряжения на дополнительном слое кремния заметное уменьшение при значениях меньше -10 В.

4.2.11 Сравнение результатов моделирования различных конструктивно-технологических разновидностей МОПТ со скрытым оксидом

В данном параграфе обобщены результаты моделирования 10-и МОПТ структур с различной конструкцией скрытого оксида. Даны оценки температурной и радиационной стойкости. В качестве критериев использовались два важнейших параметра: максималь-

ная температура саморазогрева структуры T_{\max} и ток утечки стока $I_{\text{утеч}}$ в наиболее жестком электрическом режиме работы прибора. Эти параметры непосредственно связаны и с показателями надежности. В частности, известно, что увеличение внутренней температуры работы п/п прибора на 10°C вдвое увеличивает частоту их отказов в экстремальных условиях эксплуатации (в частности, при работе в космических условиях) [175].

Эффект саморазогрева. На рисунках 4.67 и 4.67 представлены значения максимальных температур в промоделированных структурах. Высокое значение максимальной температуры для традиционного КНИ МОПТ обусловлено тем, что теплоотвод от области канала в глубину структуры может осуществляться только через слой SiO_2 , обладающий в 100 раз меньшим коэффициентом теплопроводности по сравнению с кремнием ($\lambda(\text{SiO}_2)=1,4 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ и $\lambda(\text{Si})=149 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$). Наличие «окна» в скрытом оксиде или отсутствие скрытого оксида под частью структуры, а так же замена скрытого оксида на материал с более высоким коэффициентом теплопередачи заметно улучшает теплоотвод.

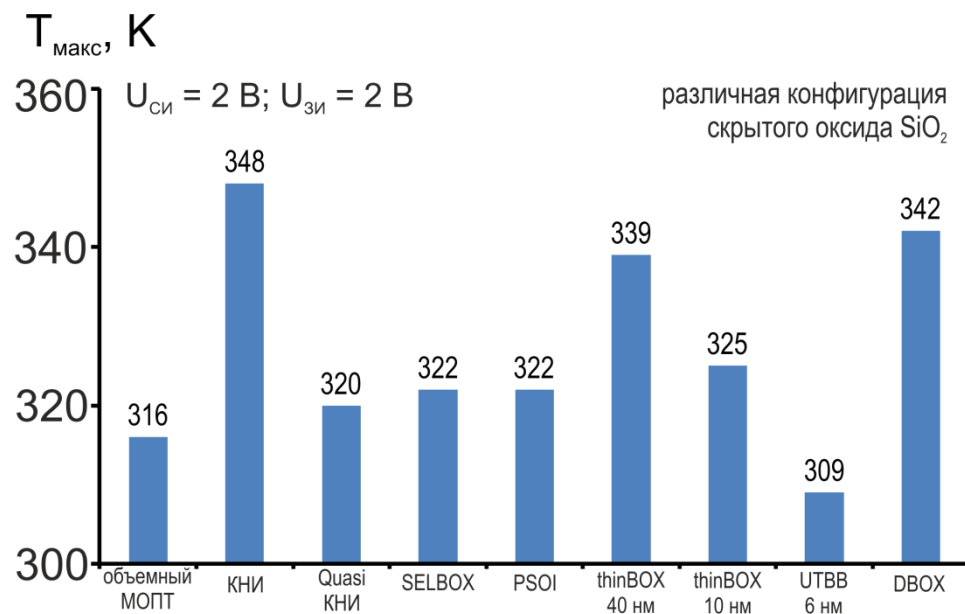


Рис. 4.66. Сравнение смоделированных максимальных температур (T_{\max}) для субмикронных МОПТ КНИ структур с различной конфигурацией скрытого оксида SiO_2

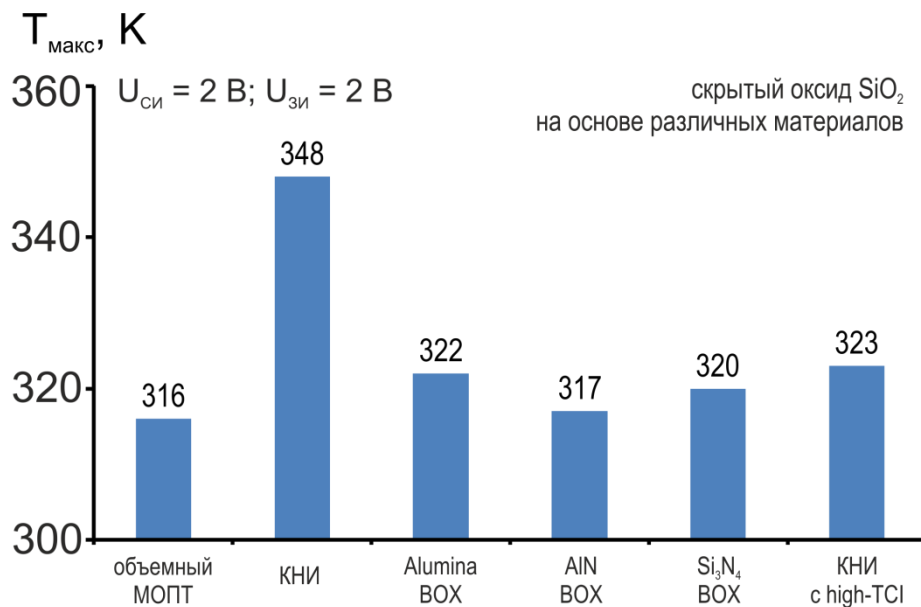


Рис. 4.67. Сравнение смоделированных максимальных температур (T_{\max}) для субмикронных МОПТ КНИ структур со скрытым оксидом на основе материалов с высоким коэффициентом теплопроводности

Радиационная стойкость. На рисунке 4.68 представлено сравнение результатов моделирования воздействия ионизирующего облучения суммарной дозой 100 крад и 600 крад на рассмотренные выше конструктивно-технологические разновидности МОПТ. В таблице 4.12 представлено сравнение радиационно-индуцированных токов утечки. Заметного увеличения тока утечки в рассмотренных структурах не наблюдается. Ток утечки КНИ структуры более чем на два порядка больше по сравнению с остальными конфигурациями. Такая разница обусловлена двумя факторами: меньшим количеством захваченного положительного заряда в более тонких слоях оксида и меньшим вкладом радиационно-индуцированного тока утечки в ток транзистора из-за отсутствия области утечки под каналом.

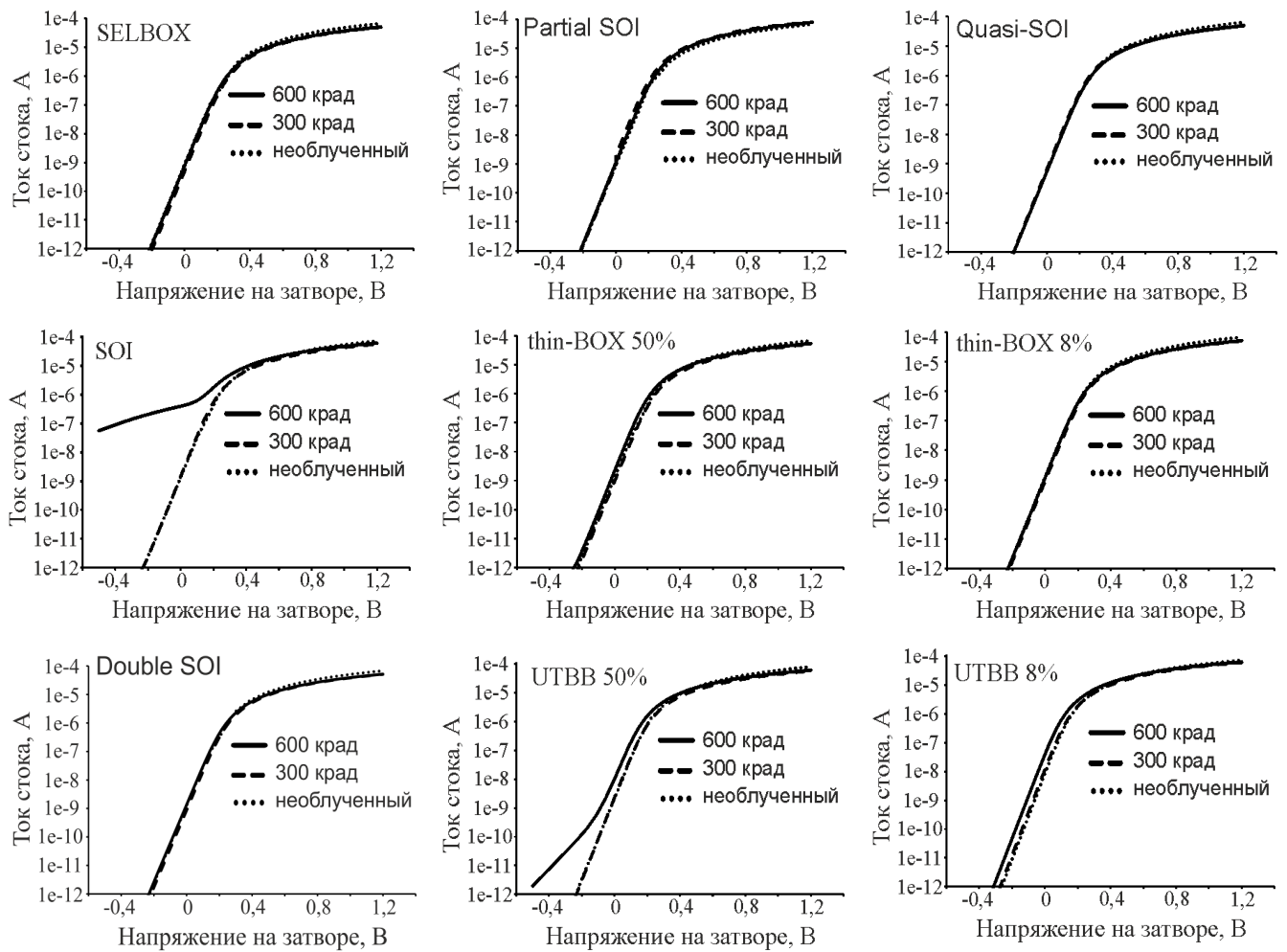


Рис. 4.68. Сравнение результатов моделирования воздействия ионизирующего облучения суммарной дозой 300 крад и 600 крад на различные конструктивно-технологические разновидности МОПТ

Таблица 4.12. Сравнение токов утечки после воздействия ионизационного облучения для различных конструктивно-технологических разновидностей КНИ МОП-транзисторов при $U_{зи}=0$ В, $U_{си}=1,2$ В.

Доза гамма излучения	$I_{утечки}$ мА/мкм					
	SOI	UTBB 50%	UTBB 12%	SELBOX	Partial SOI	Quasi-SOI
Необлученный	1E-09	2E-09	8E-09	5E-10	9E-10	5E-10
300 крад	1E-09	2E-09	1E-08	6E-10	9E-10	4E-10
600 крад	3E-07	1E-08	4E-08	8E-10	1E-09	4E-10

4.3 Выводы по главе 4

В главе представлены результаты применения разработанных электро-физических моделей для оценки температурной и радиационной стойкости различных конфигураций МОПТ структур:

- 1) структуры со скрытым оксидом L-образной формы (quasi-SOI);
- 2) структуры с «окном» в скрытом слое SiO_2 (SELBOX – Selective Buried Oxide);
- 3) структуры с частично скрытым оксидом (Partial SOI);
- 4) структуры со сверхтонким скрытым оксидом (thin-BOX SOI);
- 5) структуры с тонким карманом и тонким скрытым оксидом (UTBB SOI);
- 6) структуры со скрытым оксидом на основе оксида алюминия (Alumina);
- 7) структуры с дополнительным диэлектриком с высокой теплопроводностью (high-TCI);
- 8) структуры с дополнительным слоем кремния в скрытом оксиде (Double SOI).

С помощью разработанных моделей исследовано влияние профиля легирования на статические характеристики МОП-транзисторов и динамические характеристики схем на их основе. Рассматривались три вида профиля легирования:

- 1) ассиметричное легирование канала;
- 2) легирование с областью собственной проводимости со стороны истока – «вставка»;
- 3) легирование с областью собственной проводимости со стороны стока – graded легирование.

Результаты, полученные в диссертации, докладывались автором на конференциях [75], [79], [87], [105], [106], [113] и опубликованы в [92], [93].

Глава 5 TCAD моделирование нанометровых МОПТ с high-k диэлектриком затвора

Основным материалом, используемым в качестве подзатворного диэлектрика в МОП-транзисторах, остается диоксид кремния SiO_2 [176]. Однако, при достижении размеров канала менее 50 нм эффективная толщина подзатворного диэлектрика из SiO_2 составляет менее 1 нм, что примерно равно трем моноатомным слоям. Такая малая толщина приводит к значительному росту токов утечки через затвор из-за квантового эффекта туннелирования. С целью предотвращения этого эффекта в качестве материала для подзатворного оксида используются диэлектрики с высокой диэлектрической проницаемостью – high-k диэлектрики. В качестве замены SiO_2 ($k \approx 3,9$) рассматриваются нитрид кремния Si_3N_4 ($k \approx 7$), оксид алюминия Al_2O_3 ($k \approx 9$), оксид лантана La_2O_3 ($k \approx 27$), оксиды на основе гафния HfO_2 ($k \approx 20$) и циркония ZrO_2 ($k \approx 23$) и др. [177].

Применение high-k материала позволяет увеличить физическую толщину затвора, за счет этого многократно уменьшается ток утечки затвора и при этом сохраняется на требуемом уровне основные параметры МОП-транзисторов (емкость подзатворного оксида, ток насыщения, крутизна, пороговое напряжение и др.). Для расчетов характеристик МОП-транзисторов вводится параметр эффективная толщина подзатворного оксида (EOT – Effective Oxide Thickness), которая используется с целью сохранения прежнего значения емкости подзатворного конденсатора после замены SiO_2 на high-k материал. Общая формула для расчета эффективной толщины подзатворного оксида с high-k материалом [69]:

$$\text{EOT} = t_{\text{high-k}} \cdot \left(\frac{k_{\text{SiO}_2}}{k_{\text{high-k}}} \right) + t_{\text{SiO}_2} \quad (5.24)$$

Наиболее перспективным high-k материалом является HfO_2 , технология которого серийно освоена такими ведущими компаниями-производителями СБИС, как Intel (процессоры Sandy Bridge) [178], AMD (процессоры Llano) [179], Apple (процессоры Apple A7) [180], Samsung (процессоры Exynos 5 Octa) [181], NEC Electronics (процессоры UX7LS) [182]. Применение high-k МОПТ структур позволяет уменьшить энергопотреб-

ление и увеличить производительность по сравнению с процессорами предыдущего поколения.

На настоящий момент опубликован ряд работ, посвященных приборно-технологическому моделированию high-k структур в системе TCAD [68-71]. Однако, в имеющихся работах или вообще не приводятся или описываются частично используемые физические модели, что не может гарантировать достаточную достоверность результатов.

Работ посвященным приборно-технологическому моделированию high-k структур с учетом радиационного-воздействия крайне мало. В этих работах также не указываются используемые физические модели, и отсутствует описание ловушечных уровней [72, [183, 184].

В настоящей главе предлагается TCAD модель для МОП-транзисторов с high-k диэлектриком из оксида гафния, учитывающая особенности таких структур и проводится сравнение смоделированных характеристик с результатами экспериментов.

Основные дополнения, внесенные в TCAD модель для high-k МОПТ структуры:

- из существующего в стандартной версии TCAD набора моделей выбраны наиболее адекватные физические модели для расчета high-k структур;
- в модель туннелирования введены параметры, соответствующие структуре с подзатворным диэлектриком из оксида гафния;
- введены зависимости плотности поверхностного заряда на границе подзатворный диэлектрик-активная область от фактора радиации и температуры;
- введены зависимости концентрации ловушек на границе HfO_2/Si и в объеме HfO_2 от суммарной радиационной дозы и температуры.

Перечисленные выше нововведения прошли апробацию на отечественных и международных конференциях [22], [82], [83], [100], [102], [113] и отражены в публикациях [17, 103, 104].

5.1 Физическая модель электро-физических эффектов в МОПТ структурах с high-k диэлектриком

В современные версии системы Synopsys TCAD [1] помимо основных физических моделей, таких как гидродинамический перенос носителей, рассеяние носителей заряда,

деградация подвижности, генерация-рекомбинация и др., встроены модели эффектов, играющих важную роль в структурах с high-k материалом.

Эффект квантования, который возникает вследствие того, что толщина подзатворного оксида, длина и ширина канала глубокосубмикронных МОП-транзисторов достигли предела квантово-механического масштабирования, приводит к сдвигу порогового напряжения и уменьшению емкости затвора. Эффект туннелирования высокоэнергетических носителей заряда через сверхтонкий слой оксида под затвором приводит к возникновению тока утечки затвора. Инжекция горячих носителей вызывает сдвиг порогового напряжения и деградацию проводимости МОП-транзисторов.

Моделированию характеристик МОП-транзисторов с high-k диэлектриком на основе HfO_2 посвящен ряд работ [185]-[188]. Однако в них не указывается, какие именно модели физических эффектов используются при расчетах МОП-транзисторов с high-k диэлектриком. Для расчета high-k МОП-транзисторов проведен анализ моделей физических эффектов, используемых в среде Synopsys TCAD. Для каждого эффекта проводились расчеты по всем моделям, включенным в TCAD, и осуществлялся подбор их параметров на основании физических соображений.

Для описания эффекта квантования в системе Synopsys TCAD используются четыре физические модели. Они отличаются физической достоверностью, математической точностью и сложностью:

Модель ван Дорта является математически простой, быстрой и достоверной моделью. Данная модель подходит только для моделирования объемных МОП-транзисторов. Несмотря на то, что внешние характеристики хорошо описаны в модели, это не дает корректного распределения плотности носителей в канале.

В модели 1D Шредингера используются более сложные уравнения для описания квантовых эффектов, чем в модели ван Дорта. Модель может использоваться для моделирования квантовых ям и ультратонких КНИ МОП-транзисторов. Наличие более сложных уравнений приводит к увеличению времени расчета и возникновению проблем со сходимостью. Тем не менее, данная модель обеспечивает наибольшую точность и достоверность.

Модель градиента плотности является математически точной, но более медленной, чем модель ван Дорта. Модель может быть использована для моделирования квантовых ям и КНИ МОП-транзисторов, а так же для представления описания граничных

характеристик и распределения заряда внутри устройства. Так же модель позволяет описывать квантовые эффекты при 3D моделировании.

Модель модифицированного приближения локальной плотности (MLDA модель) является математически надежной и быстрой моделью. Модель может быть использована для моделирования объемных МОП-транзисторов и тонких КНИ МОП-транзисторов.

В наилучшей степени для описания МОП-транзисторов с high-k диэлектриком подходят модель градиента плотности концентрации (Density Gradient Quantization Model) и 1D модель Шредингера (1D Schrödinger Model). Проведенное сравнительное моделирование показало, что в модели Шредингера используются уравнения, расчет по которым занимает гораздо больше времени, чем в других физических моделях и, кроме того, из-за сложности решаемых уравнений часто возникают проблемы со сходимостью к решению. Поэтому предпочтение отдано модели градиента плотности концентрации.

Для учета эффекта туннелирования в Synopsys TCAD применяются три физические модели, одна из которых есть частный случай двух других моделей:

1) Модель нелокального туннелирования является наиболее универсальной. Туннельный ток зависит от профиля края энергетических зон на всем пути туннелируемого носителя заряда. Тем самым туннелирование представлено нелокальным процессом. Вычисление профиля края энергетических зон производится решением уравнения переноса носителей заряда и уравнения Пуассона, увеличивая время необходимое для расчета. Особенности модели:

- обрабатывает произвольные формы барьера;
- включает в себя условия нагрева носителей;
- позволяет описывать туннелирование между зоной проводимости и валентной зоной;
- включает в себя несколько разных аппроксимаций для вероятности туннелирования.

Данная модель подходит для описания туннелирования в контактах Шоттки, туннелирования в гетероструктурах и расчета тока утечки для тонких оксидов.

2) Модель прямого туннелирования является физически более достоверной, чем модель нелокального туннелирования. Особенности модели:

- учитывает трапецидальную форму барьера;
- не учитывает нагрев туннелирующих носителей;

- учитывает уменьшение потенциального барьера вследствие влияния отраженного заряда.

3) Модель Фаулера-Нордхейма является наиболее простой и является частным случаем туннелирования других моделей.

Наиболее подходящей физической моделью является модель прямого туннелирования (Direct Tunneling), обеспечивающая достаточную достоверность расчета. Однако, для моделирования МОП-транзисторов с high-k материалом необходимо провести корректировку параметров физической модели для случая туннелирования через подзатворный оксид изготовленного из диоксида гафния. Скорректированные параметры (таблица 5.13) взяты из работы [188] и включены в физическую модель прямого туннелирования Synopsys TCAD.

Таблица 5.13. Параметры Direct Tunneling модели [188].

<i>Параметр</i>	<i>SiO₂</i>	<i>HfO₂</i>
Высота барьера туннелирования, эВ	1,13	3,10
Эффективная масса, m_0	0,22	0,40
Относительная диэлектрическая проницаемость	3,9	20

Для учета эффекта переноса горячих носителей заряда представлены три физические модели:

- Классическая Lusk модель инжекции электронов (Максвеловское распределение энергии);
- Фиегна модель инжекции горячих носителей (не Максвеловское распределение энергии);
- Модель Spherical Harmonic Expansion (SHE) распределения инжектированных горячих носителей (не Максвеловское распределение энергии), рассчитанное с помощью метода разложения по сферическим гармоникам Больцмонского уравнения переноса.

По результатам расчетов все три модели показали идентичные результаты. Поэтому для расчетов выбрана стандартная модель вероятностного поведения электронов (luckу-модель).

Кроме того, необходимо учитывать, что на границе раздела HfO_2/Si присутствует большое количество дефектов, обусловленных особенностью материала HfO_2 [71], [188] и [189]. Это приводит к более интенсивному захвату заряда, чем для случая с обычным подзатворным диэлектриком из SiO_2 . На основе экспериментальных данных значения заряда поверхностных состояний Q_{int} для SiO_2 , HfO_2 и $\text{SiO}_2/\text{HfO}_2$ подзатворных оксидов принималось равным $5 \cdot 10^{10}$, $5 \cdot 10^{11}$, $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Аналогичные значения Q_{int} использовались в работах [71] и [185], посвященных TCAD моделированию high-k МОП-транзисторов.

Как показано в работах [190]-[192] подвижность носителей заряда у границы с подзатворным в структуре с high-k материалом меньше, чем для стандартной структуры с SiO_2 (рисунок 5.69). Зависимость подвижности носителей заряда от температуры и электрического поля для МОП-транзисторов с high-k материалом была включена в физическую модель.

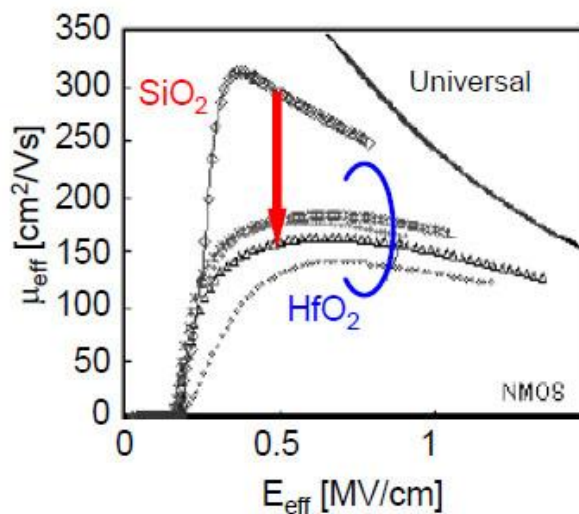


Рис. 5.69. Сравнение поверхностной подвижности носителей у границы подзатворного оксида из SiO_2 и HfO_2

Физические модели, используемые для моделирования МОП-транзисторов с high-k диэлектриком, представлены в таблице 5.14.

Таблица 5.14. Набор физических моделей для моделирования МОП-транзисторов с high-k материалом.

<i>Физический эффект</i>	<i>SiO₂</i>	<i>SiO₂/HfO₂</i>	<i>HfO₂</i>
Перенос носителей заряда	Hydrodynamic		
Рассеяние носителей заряда	CarrierCarrierScattering (BrooksHerring)		
Деградация подвижности	Enormal	Enormal(Lombardi_high-k)	
Генерация-рекомбинация носителей заряда	SRH(DopingDep) Auger		
Квантование	Density Gradient Quantization Model		
Туннелирование	DirectTunneling		
Инжекция горячих носителей	Lucky-модель		

5.2 Моделирование статических характеристик нанометровых high-k МОПТ

Адекватность предложенной TCAD модели проверялась моделированием глубоко субмикронного МОП-транзистора с поликремниевым затвором толщиной 50 нм, длиной канала 45 нм и различными материалами подзатворного оксида: SiO₂, HfO₂ и составной (стек) из SiO₂ и HfO₂. Для всех моделируемых структур эффективная толщина оксида составляла 1 нм. На рисунке 5.70 представлено схематическое изображение МОП-транзистора с подзатворным оксидом из high-k диэлектрика.

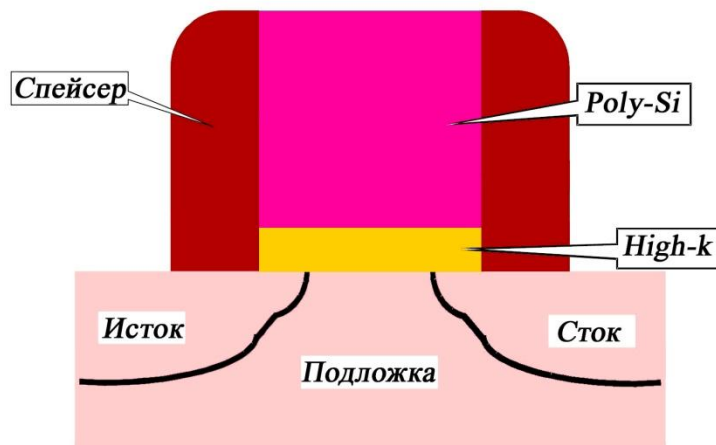


Рис. 5.70. Схематическое изображение МОП-транзистора с high-k подзатворным диэлектриком

Степень легирования областей истока и стока $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$; LDD-областей – $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Максимальное значение легирования активной области n-канала равно $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, уровень легирования p-подложки $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Поликремневый затвор легирован фосфором с максимальной концентрацией $1 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ в верхней части и минимальной концентрацией $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ в нижней части около границы с подзатворным оксидом. Пороговое напряжение, ток утечки стока и ток утечки затвора рассчитывались в режиме низкого напряжения ($U_{\text{СИ}}=0,1 \text{ В}$; $U_{\text{ЗИ}}$ изменялось от 0 до 1 В). Ток включения и крутизна рассчитывались в режиме высокого напряжения ($U_{\text{ЗИ}}=1 \text{ В}$; $U_{\text{СИ}}$ изменялось от 0 до 1 В).

На основании расчетных данных построены зависимости тока утечки затвора от напряжения на затворе (рисунок 5.71), сток-затворная (рисунок 5.72) и выходная стоковая характеристики (рисунок 5.73). В таблице 5.15 приведены значения основных параметров для транзисторов с тремя типами подзатворного диэлектрика.

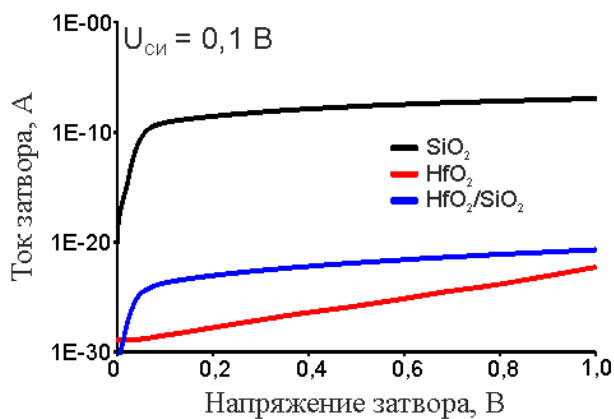


Рис. 5.71. Промоделированная зависимость тока утечки затвора

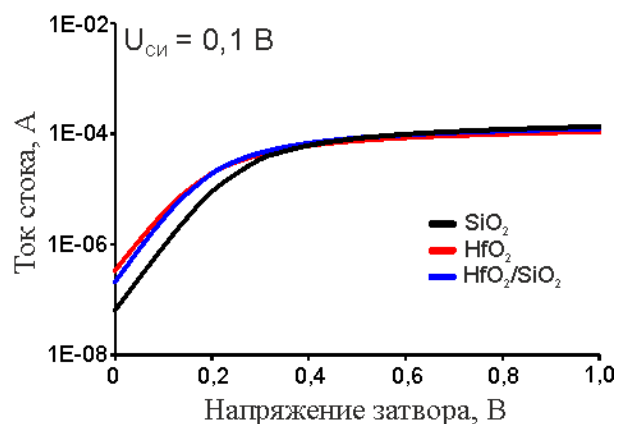


Рис. 5.72. Промоделированная сток-затворная характеристика в полулогарифмическом масштабе

Таблица 5.15. Параметры промоделированной 45 нм МОПТ структуры с различными конфигурациями затвора.

<i>Параметр</i>	<i>SiO₂ = 1 нм</i>	<i>SiO₂ = 0,5 нм HfO₂ = 3,2 нм</i>	<i>HfO₂ = 6 нм</i>
Пороговое напряжение $U_{\text{пор}}$, В	0,2	0,16	0,155
Ток утечки стока $I_{\text{утечки}}$, А	$6,39 \cdot 10^{-8}$	$2,10 \cdot 10^{-7}$	$3,37 \cdot 10^{-7}$
Ток насыщения $I_{\text{нас}}$, мА	0,949	0,940	0,857
Ток утечки затвора $I_{\text{з}}$, А	$1,00 \cdot 10^{-7}$	$1,89 \cdot 10^{-21}$	$1,80 \cdot 10^{-23}$
Подвижность электронов μ_e , м/(В·с)	190	150	160
Крутизна, $1 \cdot 10^{-4}$, А/В	11,8	10,4	9,4

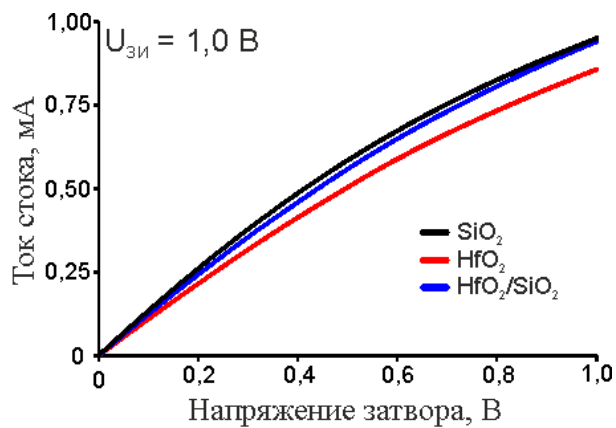


Рис. 5.73. Промоделированная стоковая характеристика

Из таблицы 5.15 видно, что с заменой диэлектрика SiO_2 на HfO_2 ток утечки затвора I_3 значительно уменьшился с 10^{-7} А/м до более чем 10^{-15} А/м для high-k диэлектрика на основе HfO_2 и стека $\text{SiO}_2/\text{HfO}_2$. Однако при этом пороговое напряжение $U_{\text{пор}}$ уменьшилось примерно на 20%, подвижность носителей в канале уменьшилась примерно на 16%. Основной причиной такой деградации является замедление движения электронов и дырок вследствие увеличения кулоновского рассеяния за счет более высокой плотности заряда на границе HfO_2/Si . Аналогичным образом уменьшилась крутизна сток-затворной характеристики S в области «больших» напряжений (таблица 5.15). Ток насыщения $I_{\text{нас}}$ незначительно уменьшился на 10% за счет деградации подвижности (рисунок 5.73).

Ток утечки стока $I_{\text{утечки}}$ (рисунок 5.72) прогнозируемо увеличивается при переходе на high-k диэлектрик, что теоретически объясняется увеличением физической толщины оксида и плотности заряда поверхностных состояний на границе HfO_2/Si [69], [185]. Это подтверждается экспериментально [71].

Таким образом, выбранные и модифицированные модели физических эффектов адекватно описывают электрические характеристики глубоко субмикронных МОП-транзисторов с high-k подзатворным диэлектриком.

Полученные результаты полностью согласуются с экспериментальными результатами работ [185], [186]-[188].

5.3 TCAD модель МОПТ с high-k диэлектриком затвора, учитывающая воздействие ионизирующего излучения

Вопрос о радиационной стойкости МОП-транзисторов с high-k диэлектриками затвора является одним из важнейших аспектов дальнейшего развития high-k технологии. Ряд ученых занимались изучением надежности high-k материалов ([70], [190], [191], [193]-[196]). Однако, работ о моделировании воздействия ионизирующего излучения, считанные единицы ([197] и [198]). В разделе описывается разработанная в диссертации радиационная модель для расчета статических характеристик МОП-транзисторов с high-k диэлектриком под воздействием ионизирующего излучения, встроенная в систему Synopsys TCAD.

С точки зрения радиационной стойкости, основной отличительной особенностью high-k материалов от оксида кремния является наличие у них более сложной структуры ловушечных уровней. В Sentaurus Devise для каждой области структуры вручную можно задать собственную концентрацию ловушечных уровней. Следовательно, для моделирования необходимо ввести концентрации ловушечных уровней, соответствующие используемому high-k материалу.

Радиационная модель настраивалась для наиболее перспективного high-k материала – оксида на основе гафния. Авторами работы [199] установлено, что для HfO_2 основным фактором, определяющим захват заряда, является наличие акцепторных уровней, обусловленных кислородными вакансиями около зоны проводимости. Энергия акцепторных уровней: 5,5 эВ, 5 эВ и 3,75 эВ [199].

На основании данных о концентрации захваченного ловушками заряда в зависимости от дозы облучения ([190], [191], [195], [197], [200]) были описаны зависимости ловушечных уровней в объеме HfO_2 (N_{ot}) и на границе раздела HfO_2/Si (N_{it}):

$$N_{ot}(D) = -3 \cdot 10^6 \cdot D^2 + 7 \cdot 10^{12} \cdot D - 5 \cdot 10^{17} \quad (5.25)$$

$$N_{it}(D) = -0.0012 \cdot D^2 + 79762 \cdot D + 7 \cdot 10^{11} \quad (5.26)$$

В связи со сложностью получения эмпирических данных, адекватность описанных зависимостей проверялось на основании результатов эксперимента из работ [196] и [201].

Как уже говорилось выше, high-k материалы в качестве подзатворного оксида целесообразно применять для МОП-транзисторов с длиной канала менее 50 нм, однако,

для оценки влияния толщины HfO_2 была рассмотрена работа [196] и проведено моделирование 250 нм МОП-транзистора с различными толщинами HfO_2 подзатворного диэлектрика.

Следующие электрофизические параметры МОП-транзисторов с high-k диэлектриком изменяются при воздействии ионизационного излучения: подвижность электронов и дырок, концентрация захваченного заряда в оксиде и на границах раздела, темп рекомбинации для электронов и дырок.

Концентрация захваченного заряда в МОП-транзисторах с high-k диэлектриком состоит из двух частей:

- объемной составляющей от HfO_2 подзатворного диэлектрика и SiO_2 мелкощелевой изоляции;
- граничной составляющей на границах HfO_2/Si и SiO_2/Si .

Таким образом, аналитические зависимости объемной $N_{\text{ot}}(D)$ и граничной составляющих $N_{\text{it}}(D)$ концентрации захваченного заряда аппроксимированы из экспериментальных данных [190], [191], [193]-[196], [200] и внедрены в Synopsys TCAD (рисунки 5.74 и 5.75).

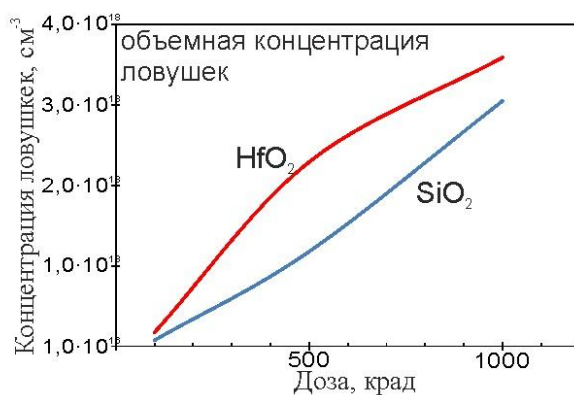


Рис. 5.74. Зависимость объемной концентрации захваченного заряда от дозы ионизационного излучения

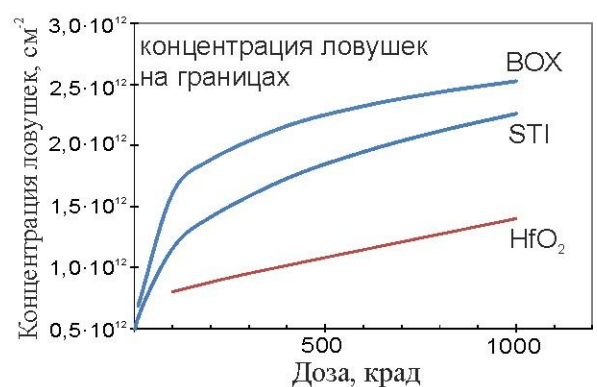


Рис. 5.75. Зависимость концентрации захваченного заряда на границе HfO_2/Si от дозы ионизационного излучения

Адекватность предложенной TCAD модели проверена путем двухэтапного моделирования.

Первый этап заключается в калибровке TCAD модели с помощью экспериментальных данных работы [196]. Было проведено моделирование воздействия ионизационного излучения до 10 Мрад для двух МОП-транзисторов с составными оксидами из

$\text{SiO}_2/\text{HfO}_2$. В первом случае толщина слоя HfO_2 составляет 3 нм, во втором 7,5 нм, толщина слоя SiO_2 в обоих случаях составляет 1 нм.

На рисунках 5.76 и 5.77 представлено сравнение эмпирических данных из работы [196] и промоделированных сток-затворных характеристик для 250 нм МОП-транзистора с различной толщиной HfO_2 составляющей подзатворного оксида. Результаты моделирования довольно близки к экспериментальным характеристикам и показывают, что разработанная TCAD модель адекватно учитывает сдвиг порогового напряжения в зависимости от величины дозы и толщины оксида.

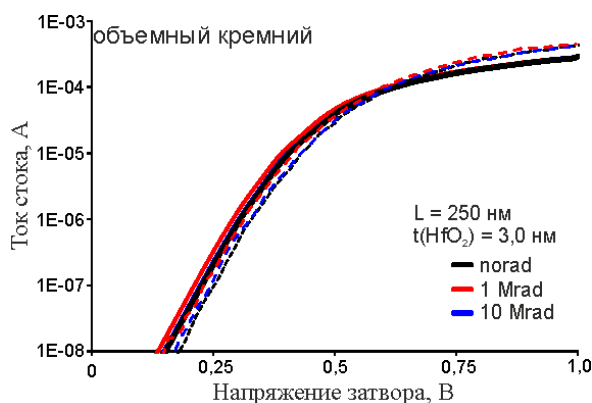


Рис. 5.76. Сравнение экспериментальных и промоделированных сток-затворных характеристик 250 нм МОПТ до и после облучения. Толщина HfO_2 составляющей подзатворного диэлектрика равна 3 нм

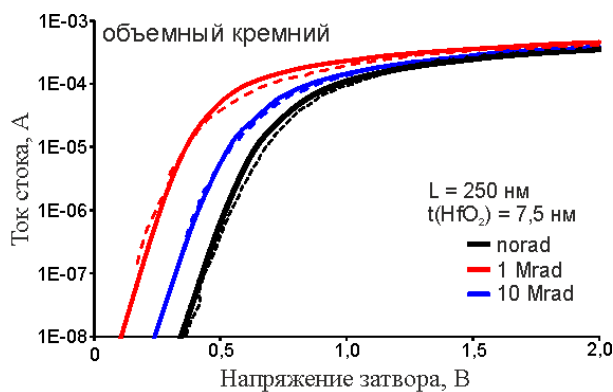


Рис. 5.77. Сравнение экспериментальных и промоделированных сток-затворных характеристик 250 нм МОПТ до и после облучения. Толщина HfO_2 составляющей подзатворного диэлектрика равна 7,5 нм

На втором этапе с откалиброванной TCAD моделью оценивается воздействие ионизирующего излучения на нанометровые МОП-структуры, изготовленные по различным технологиям.

Сначала проведено моделирование МОП-транзистора на объемном кремнии с длиной канала 45 нм. Рассматривалось две структуры: с подзатворным оксидом из SiO_2 толщиной 2 нм и подзатворным оксидом из HfO_2 толщиной 10 нм. Эффективная толщина подзатворного оксида для этих случаев составляет 2 нм.

На рисунках 5.78 и 5.79 представлены результаты моделирования с использованием разработанной TCAD модели. Видно, что в структуре с толщиной 10 нм наблюдается заметный сдвиг порогового напряжения.

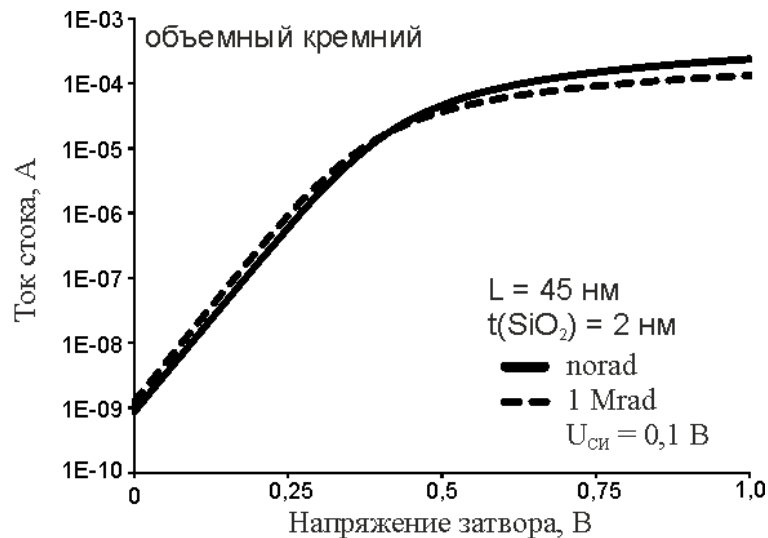


Рис. 5.78. Смоделированные входные характеристики 45 нм МОПТ с SiO_2 подзатворным оксидом толщиной 2 нм

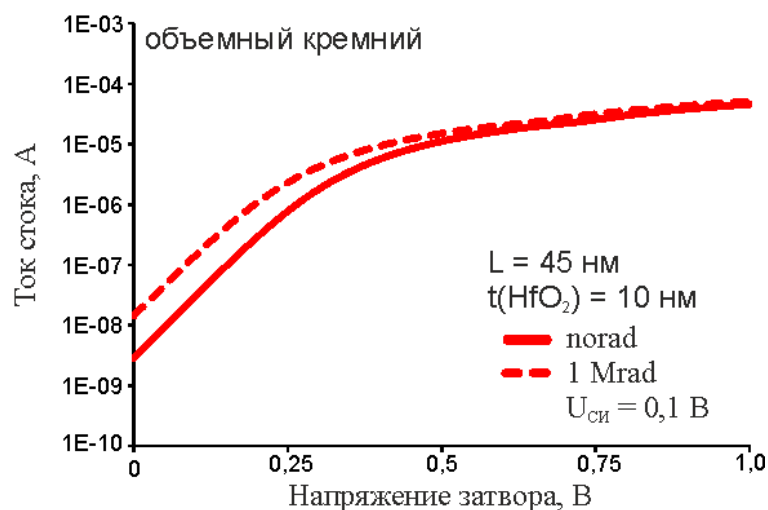


Рис. 5.79. Смоделированные входные характеристики 45 нм МОПТ с HfO_2 подзатворным оксидом толщиной 10 нм

Затем проведено моделирование нанометрового 45 нм КНИ МОП-транзистора с подзатворным оксидом толщиной 10 нм. Толщина активной области 80 нм, скрытого оксида – 145 нм. На рисунке 5.80 представлена промоделированная сток-затворная характеристика нижнего (BOX) оксида для 45 нм КНИ МОП-транзистора.

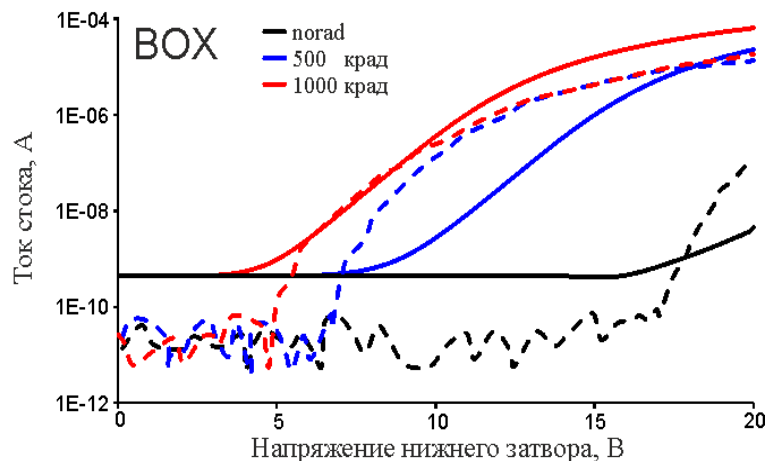


Рис. 5.80. Сравнение экспериментальных [201] и промоделированных сток-затворных характеристик нижнего затвора 45 нм КНИ МОПТ до и после облучения

Для такого транзистора вне зависимости от материала подзатворного диэлектрика после воздействия ионизационного излучения возникает ток утечки по боковой грани мелко-щелевой изоляции [72], который не учитывается при 2D моделировании. Поэтому применялся метод 3D моделирования (рисунок 5.81). Результаты моделирования сток-затворных характеристик с использованием данных из работы [72] представлены на рисунке 5.82.

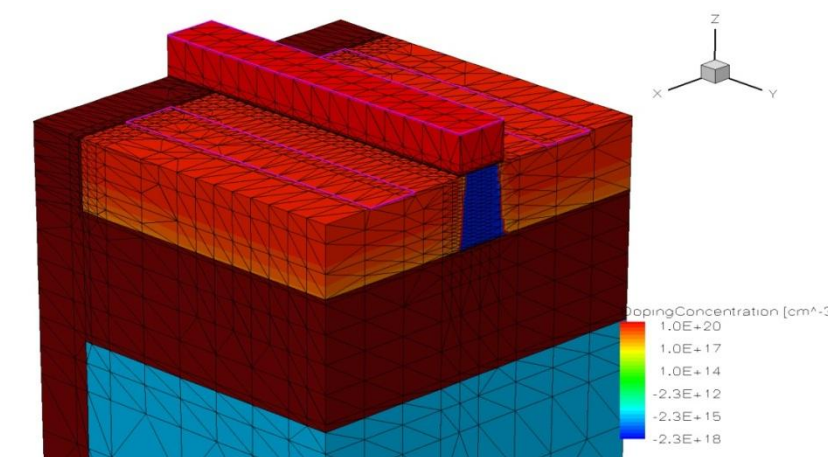


Рис. 5.81. Трехмерная структура 45 нм КНИ МОП-транзистора

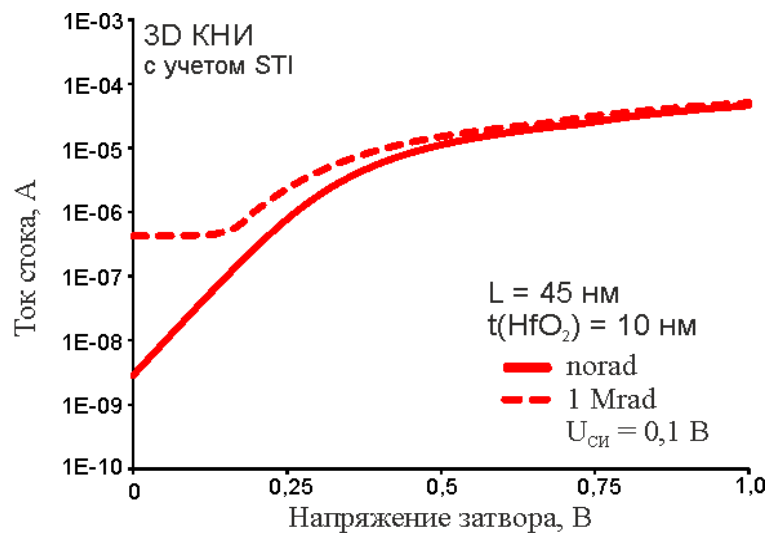


Рис. 5.82. Результаты 3D моделирования сток-затворных характеристик верхнего затвора 45 нм КНИ МОПТ до и после облучения

Результаты моделирования с внесенными изменениями и добавленными зависимостями концентрации ловушек на границе HfO₂/Si и в объеме HfO₂ показывают хорошую сходимость с экспериментальными данными. Таким образом, разработанная TCAD модель рекомендуется для моделирования воздействия радиационного излучения на МОП-структуры с high-k диэлектриком.

5.4 Выводы по главе 5

Разработана TCAD модель для глубоко субмикронных МОП-транзисторов с high-k диэлектриком затвора на основе оксида гафния (HfO₂), учитывающая воздействие ионизирующего излучения.

В модели использованы следующие нововведения:

- из существующего в стандартной версии Synopsys TCAD набора физических моделей выбраны наиболее адекватные модели эффектов туннелирования и квантования носителей заряда и скорректированы их параметры;
- в модель МОП-структуры с HfO₂ диэлектриком затвора включена адекватная зависимость поверхностей подвижности канала от электрического поля и температуры;
- введены зависимости плотности поверхностного заряда на границе подзатворный диэлектрик-активная область от фактора радиации и температуры;

- введены зависимости концентрации ловушек на границе HfO_2/Si и в объеме HfO_2 от суммарной радиационной дозы и температуры.

Для нанометровых МОПТ структур с HfO_2 диэлектриком затвора, изготовленных по объемной и КНИ КМОП-технологиям, проведена калибровка и настройка моделей по экспериментальным ВАХ необлученных и облученных приборов. Точность моделирования составляет 10-20% в диапазоне доз ионизирующего воздействия до 10 Мрад.

Результаты TCAD моделирования МОПТ структур с HfO_2 диэлектриком затвора в отечественной практике получены впервые и превышают имеющийся мировой уровень.

Результаты, полученные в диссертации, докладывались автором на крупнейших мировых конференция по радиационной стойкости 24th European conference on radiation and its effects on components and systems–2015 (RADECS 2015) и 2017 International Workshop on Reliability of Micro- and Nano-Electronic Devices in Harsh Environment” (IWRMN-EDHE 2017).

Глава 6 Применение разработанной библиотеки моделей в практике проектирования элементной базы радиационной и температурной стойких СБИС и БИС со структурой КНИ

Разработанная в диссертации библиотека TCAD моделей была использована в практических работах, проводимых в рамках хоздоговорных и госбюджетных НИР, договоров о научно-техническом сотрудничестве с рядом отечественных предприятий и организаций [120], [202]-[213] а также зарубежными партнерами [87], [214].

Работы проводились в двух направлениях:

1. Настройка и оптимизации существующей КМОП КНИ технологий с микронными, субмикронными и глубоко субмикронными размерами элементов с целью обеспечения необходимого уровня радиационной и температурной стойкости;
2. Критический анализ и прогнозные оценки эффективности применения новых конструктивно-технологических разновидностей МОПТ КНИ структур обладающих повышенной радиационной и температурной стойкостью.

6.1 Моделирование субмикронных КНИ МОПТ с учетом нейтронного воздействия

В рамках НИР «Разработка физических моделей приборного моделирования характеристик субмикронных транзисторов КМОП КНИ с учетом воздействия спецфакторов» с филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова» [203] и [207] была поставлена задача исследовать влияние воздействия нейтронов на характеристики КНИ МОП-транзисторов с длиной канала 0,6 мкм, изготовленных по технологии 0,35 мкм. Разработанная в главе 2 модель учета деградации параметров МОП-структур после нейтронного воздействия использовалась для моделирования характеристик исследуемых транзисторов. Модель учитывает деградацию следующих параметров: времени жизни, поверхностной рекомбинации, подвижность носителей.

На рисунке 6.83 приведены результаты моделирования сток-затворных характеристик КНИ МОП-транзистора после воздействия потока нейтронов до $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ с использованием разработанной TCAD модели.

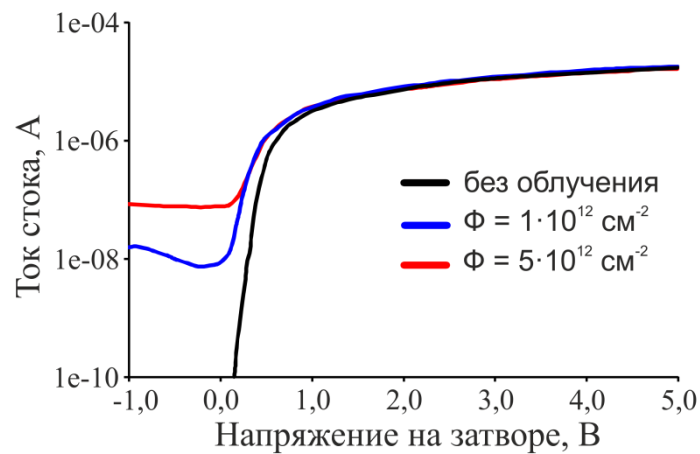


Рис. 6.83. Промоделированные ВАХ 0,6 мкм КНИ МОПТ структуры до и после облучения нейтронами

Из рисунка 6.83 видно, что в результате изменения времени жизни носителей заряда, происходит увеличение токов утечек.

6.2 Оценка сбоеустойчивости ячеек КМОП СОЗУ на основе 0,24 мкм МОПТ КНИ структур с одно- и двухслойным скрытым диэлектриком с учетом воздействия гамма излучения

При выполнении совместного российско-китайского гранта по исследованию и моделированию глубоко субмикронных и нанометровых КМОП структур [214] проведено исследование деградации характеристик 0,24 мкм КНИ МОПТ с дополнительным слоем кремния в скрытом оксиде (Double SOI) после воздействия гамма-излучения. Также проведено сквозное TCAD-SPICE моделирование воздействия ОЯЧ на ячейку памяти на основе рассматриваемых транзисторов [215].

Одним из условий надежной работы аэрокосмического оборудования и устройств специального назначения является высокая отказоустойчивость ячеек памяти к удару тяжелой заряженной частицы [216]. Одним из критических параметров, влияющих на отказоустойчивость, является температура, при которой происходит воздействие. Так как основные параметры транзистора и физических процессов образования треков частиц сильно зависят от температуры [217].

На первом этапе была проведена калибровка TCAD модели Double SOI конфигурации на основе экспериментальных данных работы наших коллег с китайской стороны [218]. На рисунках 6.84 и 6.85 представлены промоделированные и измеренные ВАХ структуры до и после воздействия гамма излучения до 500 крад при нулевом и отрицательном смещении на дополнительном слое кремния ($U_{SOI2} = -7$ В).

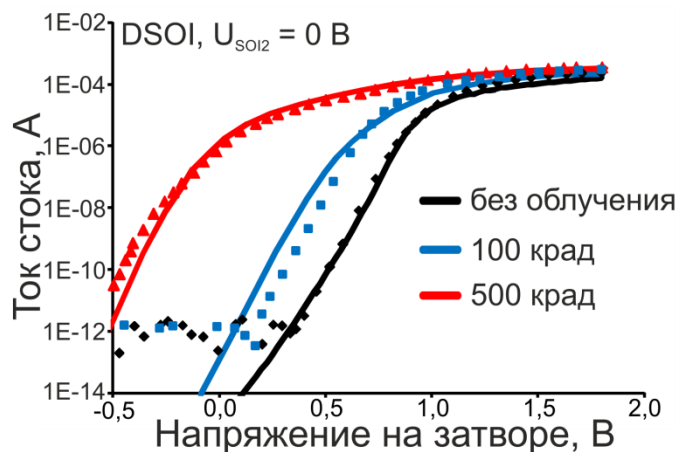


Рис. 6.84. Промоделированные (линии) и измеренные (точки) сток-затворных характеристики 0,2 мкм КНИ МОПТ с дополнительным слоем кремния в скрытом оксиде до и после воздействия гамма излучения при $U_{SOI2} = 0$ В

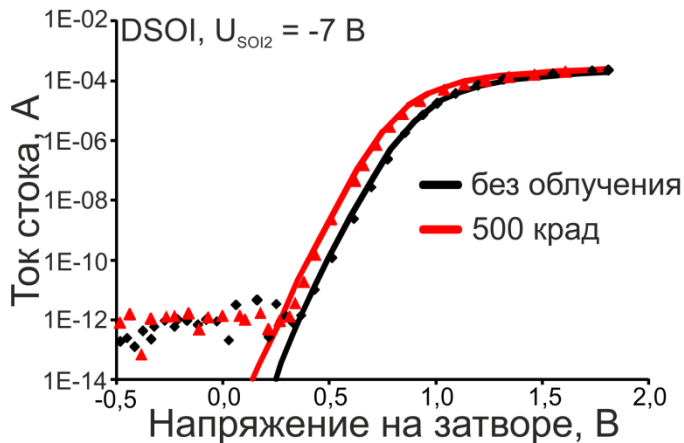


Рис. 6.85. Промоделированные (линии) и измеренные (точки) сток-затворных характеристики 0,2 мкм КНИ МОПТ с дополнительным слоем кремния в скрытом оксиде до и после воздействия гамма излучения при $U_{SOI2} = -7$ В

Как уже было отмечено в главе 4, воздействие ионизирующего излучения на DSOI конфигурацию без смещения идентично воздействию на традиционную КНИ конфигурацию. При отрицательном напряжении на дополнительном слое кремнии наблюдается значительно меньшая деградация порогового напряжения и тока утечки.

На втором этапе полученная модель использована для оценки сбоеустойчивости 0,24 мкм КНИ МОПТ с конфигурацией Double SOI с помощью метода сквозного TCAD-SPICE моделирования ячейки памяти [74]. Проведено моделирование трех ячеек памяти на основе различных КНИ конфигураций: первая конфигурация стандартный КНИ МОПТ; вторая – КНИ МОПТ с окном в скрытом оксиде под областью канала; третья – КНИ МОПТ с дополнительным слоем кремния в скрытом оксиде. Промоделированная зависимость критического значения линейных потерь энергии от температуры представлена на рисунке 6.86.

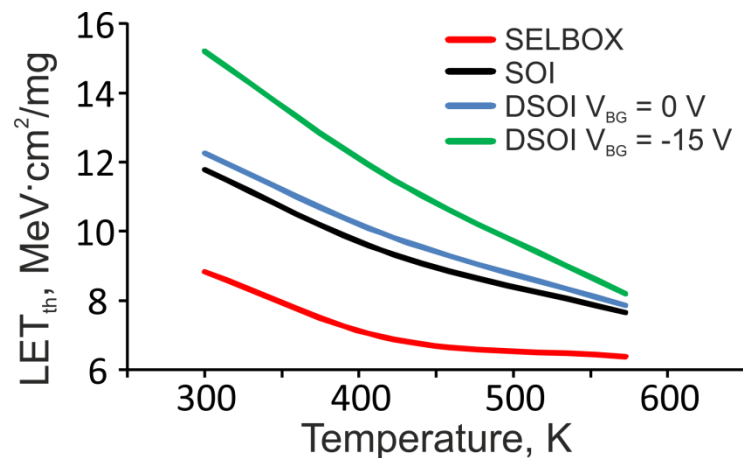


Рис. 6.86. Зависимость критического значения линейных потерь энергии от температуры

Чувствительность Double SOI конфигурации с нулевым смещением на дополнительном слое кремния также идентична традиционной КНИ конфигурации. При наличии большого отрицательного смещения сбоеустойчивость такой конфигурации повышается на ~25% при комнатной температуре и на ~15% при температурах порядка 150°C.

6.3 Прогнозное моделирование ВАХ субмикронных КНИ МОПТ, изготовленных по отечественным КМОП технологиям с учетом саморазогрева и высокотемпературных эффектов

6.3.1 0,24 мкм КНИ МОПТ, изготовленные по высокотемпературной КМОП технологии

Совместно с Зеленоградским нанотехнологическим центром было проведено моделирование при выполнении НИР «Исследование и разработка технологий элементной

базы высокотемпературной микро и нанoeлектроники» [205] и сравнение с экспериментальными данными характеристик 10 мкм КНИ МОПТ структуры изготовленной по высокотемпературной 0,24 мкм технологии ПАО «Микрон» (рисунок 6.87).

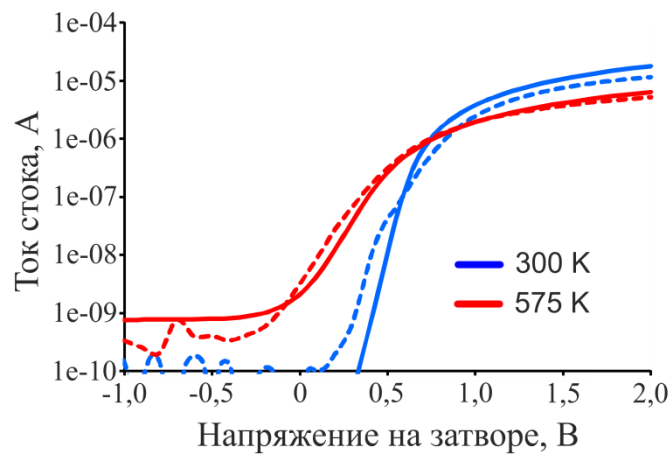


Рис. 6.87. Промоделированные (сплошная линия) и экспериментальные (пунктирная линия) ВАХ 10/10 мкм КНИ МОПТ структуры изготовленной по высокотемпературной технологии (ПАО «Микрон»)

6.3.2 Субмикронные КНИ МОПТ, изготовленные по КМОП технологии 0,35 мкм

При выполнении НИР «Исследование и разработка радиационных моделей элементов кремний-германиевых аналого-цифровых БиКМОП СБИС для проектирования космической радио- и телекоммуникационной аппаратуры» совместно с ФГБНУ «НИИ ПМТ» [204] было проведено моделирование технологического процесса изготовления МОП-транзистора по технологии 0,35 мкм с длиной канала 0,5 мкм и моделирование вольт-амперных характеристик для различных температур с учетом саморазогрева.

На рисунках представлены смоделированные сток-затворные характеристики n-МОП-транзисторов А-типа с размерами затвора $L/W=0,5/5$ мкм при температурах -30°C , 27°C , 125°C и 225°C с учетом саморазогрева.

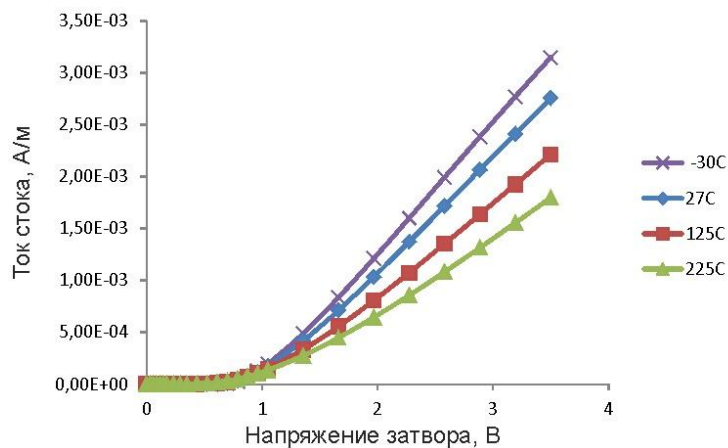


Рис. 6.88. Смоделированные сток-затворные характеристики n-МОПТ А-типа с размерами затвора $L/W=0,5/5$ мкм при напряжении сток-исток 3,5 В и температуре окружающей среды -30°C , 27°C , 125°C и 225°C с учетом саморазогрева
(в линейном масштабе)

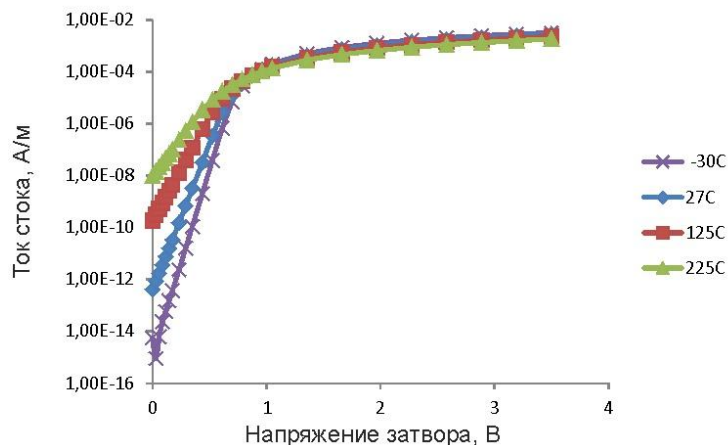


Рис. 6.89. Смоделированные сток-затворные характеристики n-МОПТ А-типа с размерами затвора $L/W=0,5/5$ мкм при напряжении сток-исток 3,5 В и температуре окружающей среды -30°C , 27°C , 125°C и 225°C с учетом саморазогрева
(в полулогарифмическом масштабе)

На рисунках 6.90 и 6.91 представлено смоделированное распределение концентрации носителей заряда и температуры в n-МОПТ-транзисторах с размерами затвора $L/W=0,5/5$ мкм при температуре окружающей среды 27°C и с учетом саморазогрева.

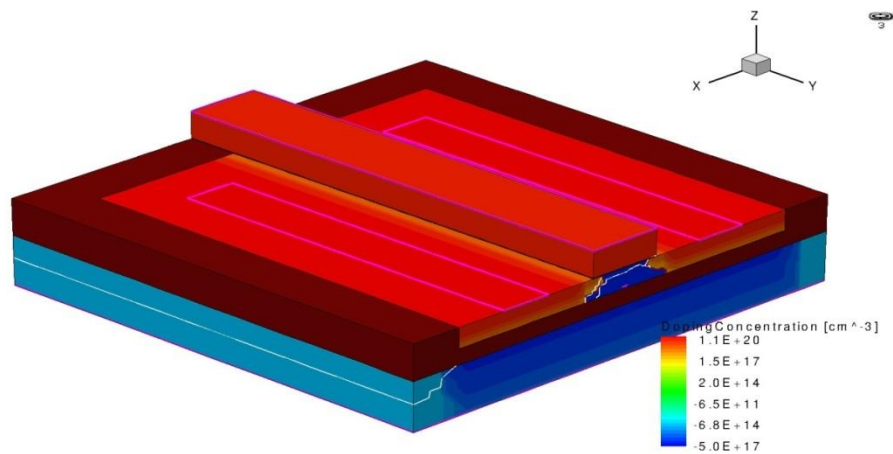


Рис. 6.90. Смоделированное распределение концентрации носителей заряда в n-МОПТ с размерами затвора $L/W=0,5/5$ мкм

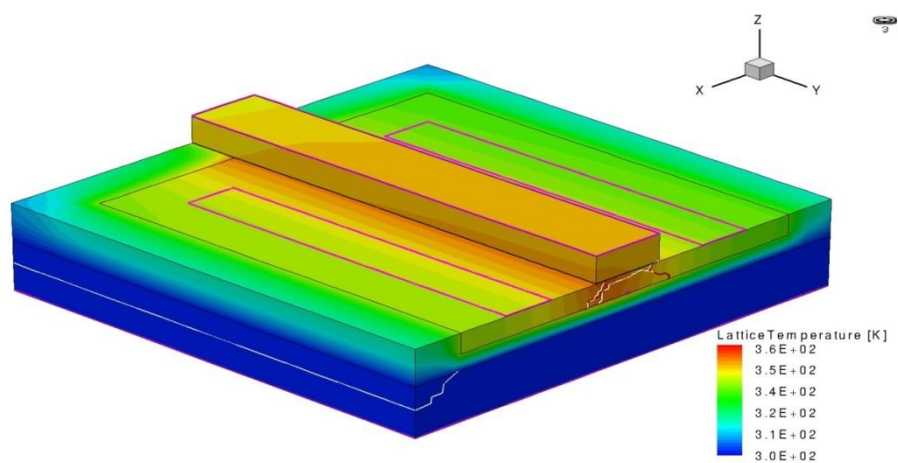


Рис. 6.91. Смоделированное распределение температуры в n-МОПТ с размерами затвора $L/W=0,5/5$ мкм в режиме высокого напряжения ($U_{СИ}=3,5$ В, $U_{ЗИ}=3,5$ В) при температуре окружающей среды $T=27^{\circ}\text{C}$

Видно, что максимальный нагрев в МОП транзисторной структуре происходит в районе стокового рп-перехода, разность температур относительно окружающей среды равна 60 К.

6.4 Моделирование КНС МОП-транзисторов на основе отечественной технологии

При выполнении НИР «Мультифизическое моделирование полупроводниковых приборов и интегральных схем, работающих в экстремальных условиях» [210] были проведены работы по моделированию разновидностей КНС МОП-структур с областью собственной проводимости в канале со стороны истока [120], [202]. Отечественными

разработчиками была предложена конструкция КНС МОП-транзистора с неравномерным легированием канала (рисунок 6.92) [147]. В канале со стороны истока создается область собственной проводимости («вставка»). Такая вставка обеспечивает уменьшение «эффективной» длины канала, значительно снижая пороговое напряжение и увеличивая быстродействие.

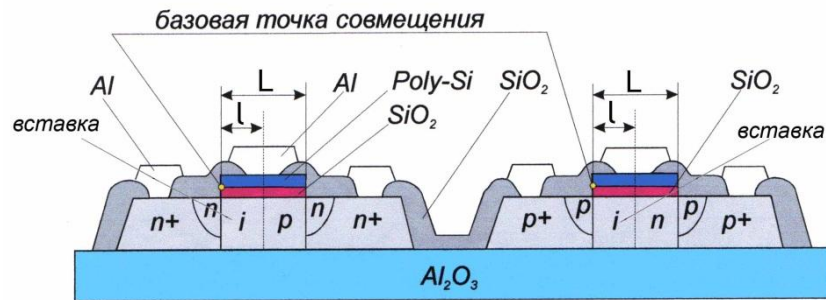


Рис. 6.92. Структура КНС КМОП-пары со вставкой области собственной проводимости в канале

6.4.1 Исследование возможности эквивалентной замены UTSi pSemi КНС МОПТ структур с $t_{Si}=0,1$ мкм на отечественные КНС МОПТ структуры с $t_{Si}=0,3$ мкм и со вставкой в области канала

Развитие КНС технологии стало возможным благодаря разработанному компанией Peregrine методу изготовления КНС приборов с толщиной пленки кремния порядка 100 нм и минимальным количеством дефектов – UTSi технологии [219].

Основными преимуществами UTSi КНС технологии является высокое быстродействие и радиационная стойкость. К сожалению, получение КНС структур с тонким слоем кремния порядка 0,1 мкм связано с определенными технологическими проблемами. Поэтому специалистами по элементной базе проводятся работы по эквивалентной замене 0,1 мкм UTSi КНС МОПТ структур на более простые КНС МОПТ структуры, изготовленные по стандартной технологии и её разновидностям.

В настоящем разделе рассмотрен вариант КНС МОПТ конструкции, предложенной А.С. Адониным [147].

Суть предложенного А. С. Адониным метода заключается в создании самосовмещённых областей истока и стока методом диффузионного легирования. В отечественной технологии с проектными нормами 0,75 мкм толщина активного слоя кремния составляет 0,3 мкм и области истока и стока изготавливаются методом ионного легирования.

При формировании самосовмещенных областей истока и стока с помощью ионной имплантации может происходить амортизация областей истока/стока на всю толщину. Аморфная пленка не будет надлежащим образом рекристаллизироваться от сапфировой подложки, что приведет к высокому удельному сопротивлению пленки. При использовании диффузионного легирования, сапфировая подложка является диффузионным барьером для атомов легирующей примеси, в результате получаются тонкие области истока/стока с низким удельным сопротивлением. Из-за физических ограничений возможно изготовления структур с минимальной толщиной пленки кремния порядка 0,1 мкм, что позволяет уменьшить емкость перекрытия затвора, по крайней мере, в 3 раза.

С помощью Synopsys TCAD исследована эффективность применения данного метода для технологии с проектными нормами 0,75 мкм.

В таблице 6.16 приведены исходные данные для моделируемых КНС МОПТ структур.

Таблица 6.16. Исходные данные моделируемых КНС МОПТ структур.

Параметр	КНС МОПТ, стандартная технология	КНС МОПТ, UTSi технология
Топологическая длина канала	0,75 мкм	
Ширина канала	7,5 мкм	
Толщина активной области	0,3 мкм	0,1 мкм
Толщина скрытого оксида	20 нм	
Толщина слоя Al ₂ O ₃	200 мкм	
Толщина слоя поликремния	270 нм	
Степень легирования канала	9,60E+16 см ⁻³	1,00E+17 см ⁻³

Были рассчитаны следующие конфигурации структур:

- 0,75 мкм КНС МОПТ с толщиной активной области 0,3 мкм без «вставки» и со «вставкой» 25%, 50% и 75%;
- 0,75 мкм КНС МОПТ с толщиной активной области 0,1 мкм без «вставки» и со «вставкой» 25%, 50% и 75%.

Моделирование вольт-амперных характеристик проводилось при двух режимах: OFF ($U_{СИ}=0,1$ В, $U_{ЗИ}$ меняется от 0 до 3,5 В) и ON ($U_{СИ}=3,5$ В, $U_{ЗИ}$ меняется от 0 до 3,5 В). Моделирование динамических характеристик проводилось на основе КМОП ячейки, состоящей из рассматриваемых транзисторов.

В таблице 6.17 представлены статические параметры промоделированных структур.

Таблица 6.17. Значение основных статических параметров промоделированной структуры n-канального КНС МОПТ с различными размерами области собственной проводимости.

Длина канала	0,75 мкм								0,5 мкм
Толщина слоя кремния	0,3 мкм				0,1 мкм				0,1 мкм
«Вставка», %	0%	25%	50%	75%	0%	25%	50%	75%	0%
$U_{пор}$, В	0,94	0,86	0,81	0,6	0,67	0,62	0,55	0,43	0,6
$I_{утеч}$, А	8E-14	2E-13	4E-13	9E-10	3E-13	5E-13	6E-12	8E-09	9E-12
$I_{нас}$, мА	4,90	5,78	7,00	9,71	6,25	6,95	7,47	8,60	7,67

На рисунке 6.93 представлены зависимости параметров для n- и p-канальных КНС МОПТ от длины области собственной проводимости.

Из анализа данных таблицы 6.17 и рисунка 6.93 следует, что такой конструкторско-технологический прием, как встраивание в канал области собственной проводимости позволяет получить два варианта замены UTSi КНС МОПТ с длиной канала $L=0,5$ мкм и $t_{Si}=0,1$ мкм (в таблице 6.17 оба варианта затемнены):

- Обычный КНС МОПТ с большой длиной канала $L=0,75$ мкм и более толстой пленкой $t_{Si}=0,3$ мкм, с толщиной «вставки» 50% от L , изготавливаемый по отечественной технологии;
- КНС МОПТ с большей длиной канала $L=0,75$ мкм и «тонкой» пленкой $t_{Si}=0,1$ мкм, с толщиной вставки 25-50% от L , изготавливаемый по UTSi технологии.

В первом случае обеспечивается импортозамещение МОП-транзистора фирмы Peregrine на отечественный аналог. Во втором случае используется импортный транзистор с большей длиной канала (0,75 мкм вместо 0,5 мкм).

В обоих случаях изготовление связано с меньшими технологическими трудностями и материальными затратами.

Аналогичные результаты получены для КНС p-МОПТ структур.

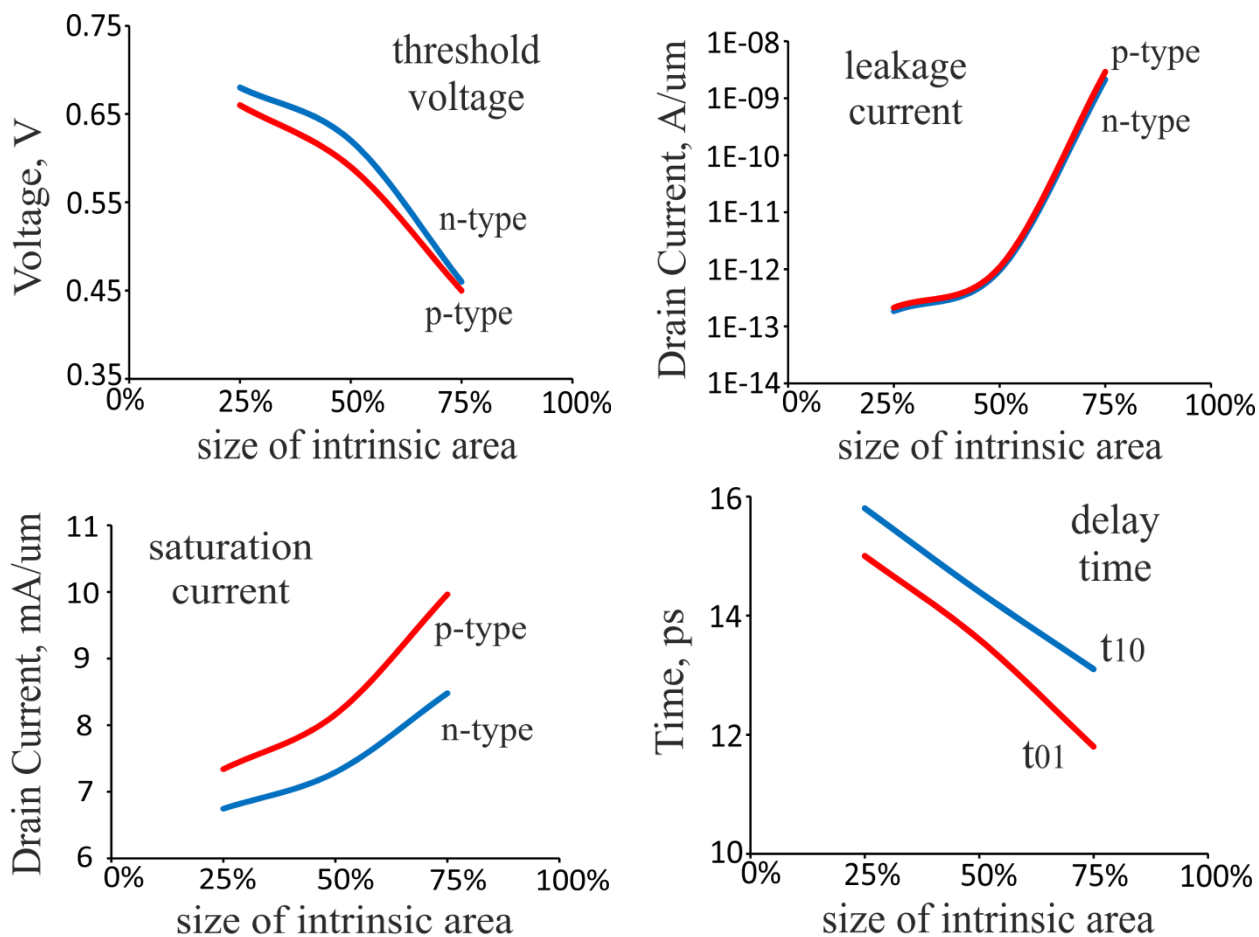


Рис. 6.93. Зависимость нормированных параметров от длины области собственной проводимости

На рисунке 6.94 представлено сравнение вольт-амперных характеристик оригинального 0,75 мкм КНС МОПТ с толщиной активного слоя 0,3 мкм, 0,75 мкм КНС МОПТ с тонким активным слоем $t_{Si}=0,1$ мкм и 0,5 мкм КНС МОПТ.

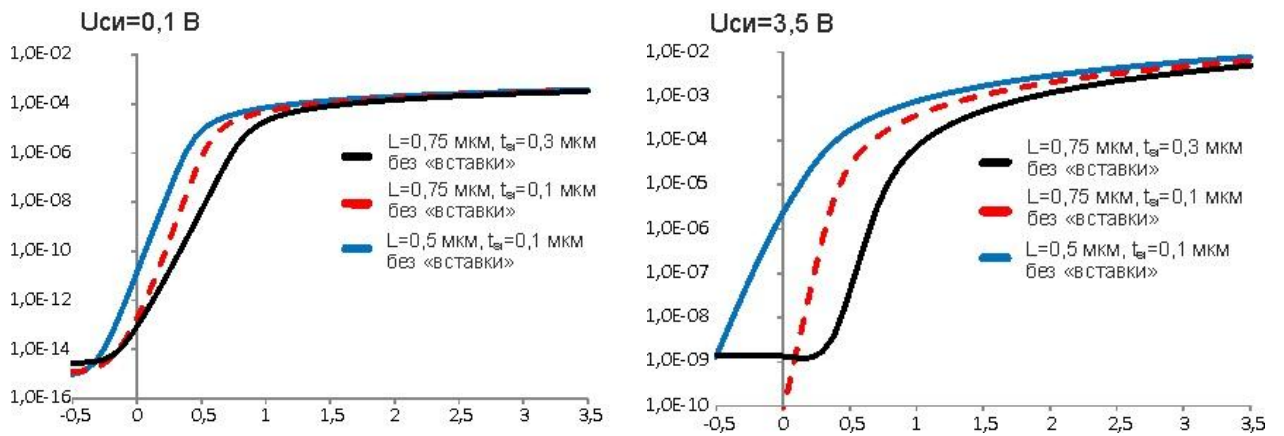


Рис. 6.94. Сравнение промоделированных сток-затворных характеристик

В таблице 6.18 представлены динамические параметры промоделированных структур.

Таблица 6.18. Значение динамических параметров промоделированных структур.

Длина канала	0,75 мкм					0,5 мкм
Толщина слоя кремния	0,3 мкм	0,1 мкм				0,1 мкм
«Вставка», %	0%	0%	25%	50%	75%	0%
$t_{зад01}$, пс	20,5	17,6	15,0	13,6	11,8	10,9
$t_{зад10}$, пс	20,7	18,3	15,8	14,4	13,1	11,0

На рисунке 6.95 представлено сравнение динамических характеристик КМОП ячеек на основе оригинального 0,75 мкм КНС МОПТ с толщиной активного слоя 0,3 мкм, 0,75 КНС МОПТ с тонким активным слоем $t_{Si}=0,1$ мкм и 0,5 мкм КНС МОПТ с $t_{Si}=0,1$ мкм.

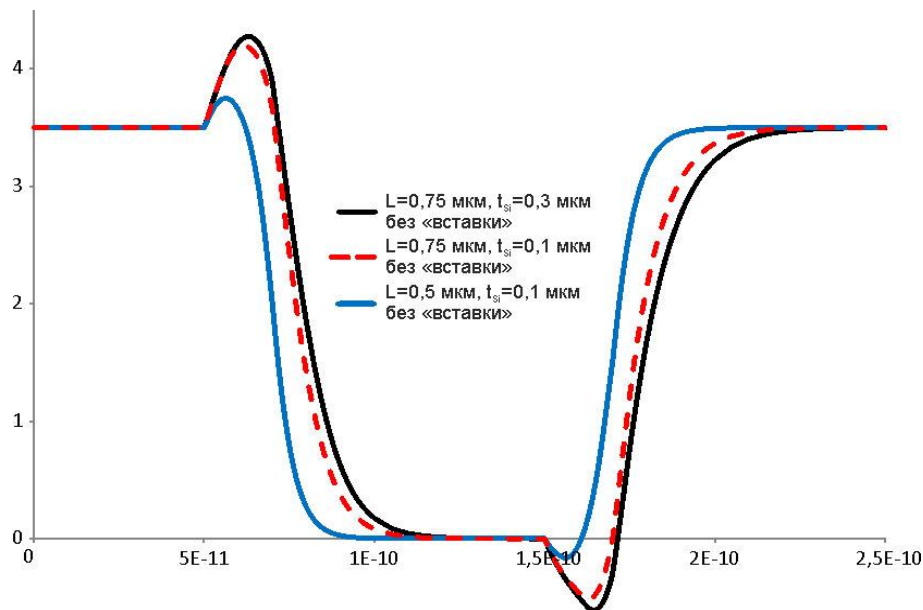


Рис. 6.95. Сравнение промоделированных динамических характеристик

Результаты моделирования показывают, что времена задержки для КМОП ячейки на основе структуры с тонким активным слоем $t_{si}=0,1$ мкм на 12%-14% меньше по сравнению со временами задержки для КМОП ячейки на основе структуры $t_{si}=0,3$ мкм.

Результаты моделирования с применением «вставки» показывают, что такие параметры как пороговое напряжение, ток насыщения и время задержки улучшаются, однако при длине области «вставки» 75% канала ток утечки увеличивается на 5 порядков. На рисунках 6.96 и 6.97 представлено сравнение статических и динамических характеристик оригинального 0,75 мкм КНС МОПТ с толщиной активного слоя 0,3 мкм, 0,75 мкм КНС МОПТ с тонким активным слоем 0,1 мкм и длиной области «вставки» 50% и КНС МОПТ с длиной канала 0,5 мкм.

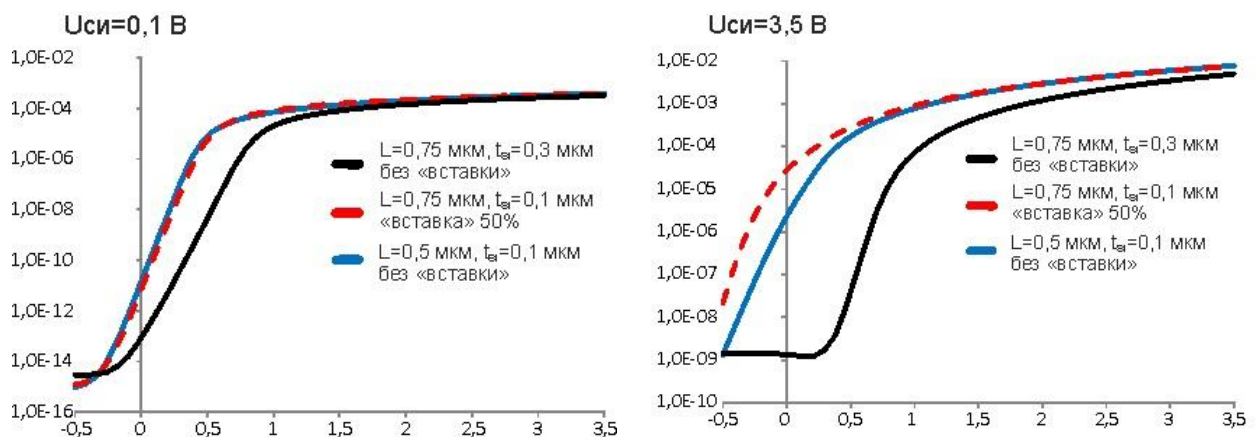


Рис. 6.96. Сравнение промоделированных сток-затворных характеристик

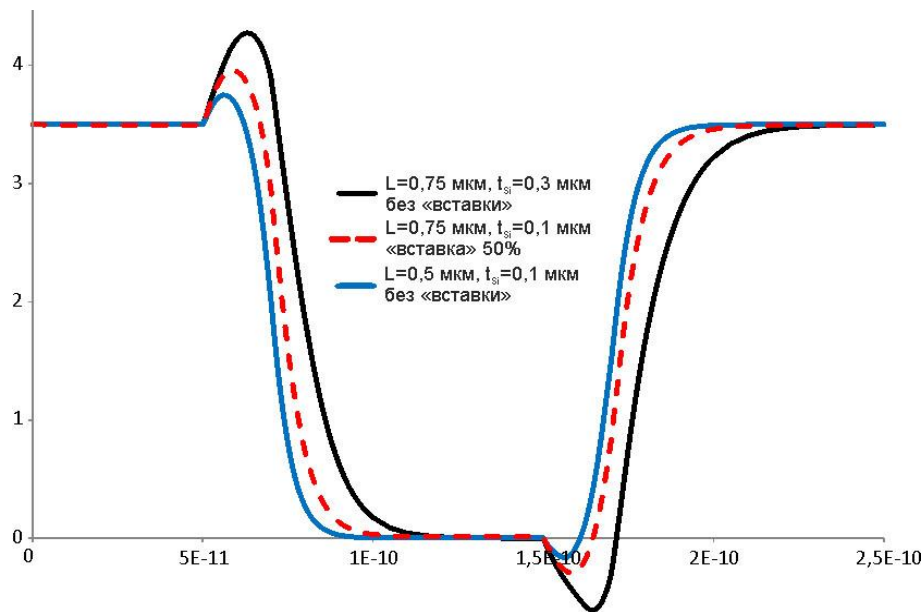


Рис. 6.97. Сравнение промоделированных динамических характеристик

Таким образом, использование «вставки» позволяет получить 0,75 мкм КНС МОП-транзистор с характеристиками соответствующие транзистору с топологической длиной канала 0,5 мкм.

6.5 Выводы по главе 6

В главе представлены результаты использования разработанной библиотеки TCAD моделей электрофизических параметров п/п материалов и приборных структур, учитывающей влияние высоких и низких температур и различных видов радиации при выполнении ряда х/д НИР с предприятиями филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова», ДЦ «ПМС» МИЭТ, ФГБНУ «НИИ ПМТ», а также проектов по грантам РФФИ и НИУ ВШЭ:

1. Высокотемпературная (high-T) TCAD модель КНИ КМОП транзистора, учитывающая специфику приборной структуры для обеспечения надежной работы в режиме повышенных температур: металлизация на основе меди (Cu) и повышенную степень легирования активной области канала; набор физических и полуэмпирических моделей для коррекции теплопроводности кремния и при повышенных температурах использована в ДЦ «ПМС» МИЭТ в процессе НИР соглашение №14.581.21.0007.

2. TCAD модели для математического моделирования п/п приборов и элементов СБИС с учетом температурных эффектов (внутренний саморазогрев и внешняя температура) и с учетом воздействия спецфакторов использованы предприятием филиал РФЯК-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова» при выполнении НИР «Разработка физических моделей приборного моделирования характеристик субмикронных транзисторов КМОП КНИ с учетом воздействия спецфакторов», в частности:
 - при приборно-технологическом моделировании КНИ МОП-транзисторов с проектными нормами 0,35 мкм с учетом воздействия спецфакторов и температуры для технологической линии МВЦ (промежуточный отчет о НИР «Модель-С» № 199-293-98/23.06.2011, результаты ПТМ на МНИ №199-293-036/25.03.2013);
 - при разработке компактных SPICE-моделей КНИ МОП-транзисторов с учетом воздействия спецфакторов и температуры для проектирования КМОП СБИС КНИ с проектными нормами 0,35 мкм (промежуточный отчет о НИР «Модель-С» № 199-293-067/14.03.2012, SPICE модели на МНИ №199-293-158.1/12.11.2013).
3. Библиотека TCAD моделей КНИ КМОП транзисторных структур, учитывающая радиационные воздействия, была использована для оценки влияния гамма излучения на МОП-транзисторы с проектными нормами 0,5 и 0,35 мкм, изготовленные по технологии 5НР и 7НР кремний-германиевых аналого-цифровых БиКМОП СБИС для космической и телекоммуникационной аппаратуры на предприятии ФГБНУ «НИИ ПМТ» в процессе выполнения НИР «Исследование и разработка радиационных моделей элементов кремний-германиевых аналого-цифровых БиКМОП СБИС для проектирования космической радио- и телекоммуникационной аппаратуры».
4. Библиотека TCAD моделей КМОП МОП-транзисторов с размерами канала 0,5-0,18 мкм, учитывающая температурные эффекты, была использована при выполнении НИР по исследованию КМОП КНИ схем экстремальной электроники в расширенной диапозоне температур (от -200 до +300°С) в процессе выполнения НИР «Исследование перспективных схем экстремальной электроники в расширенном диапозоне температуры (-200 ...+300°с)».

Заключение

Основным результатом диссертации является созданный комплекс радиационных и температурных моделей, как отдельных электрофизических эффектов, так и субмикронных и нанометровых структур КНИ МОП-транзисторов в целом, применение которых существенно расширяет возможности существующих приборно-технологических САПР (TCAD) в части проектирования КМОП БИС и СБИС для ответственных применений.

Основные научные результаты:

1. Усовершенствованные и новые модели электрофизических параметров п/п структур, учитывающие воздействие различных видов радиации, в частности:
 - в модель, учитывающую γ -излучение, по сравнению с ранее известными моделями введены новые более физические и полуэмперические зависимости от дозы излучения для эффективной подвижности, скорости поверхностной рекомбинации носителей заряда и плотности ловушек в диэлектрике и на границе раздела диэлектрик-полупроводник;
 - в модель для нейтронов введены новые зависимости времени жизни, поверхностной рекомбинации и подвижности от величины флюенса нейтронов;
 - модель для протонов, разработана впервые и учитывает аддитивное влияние эффектов смещения и ионизации.
2. Модифицированы температурные модели электро-тепловых параметров, учитывающие эффекты зависимости теплопроводности кремния от подвижности, толщины слоя кремния и концентрации носителей в слое кремния; для низких температур введена зависимость теплопроводности кремния от температуры в диапазоне от 20 К до 200 К. За счет этого улучшена точность моделирования эффектов саморазогрева и расширен температурный диапазон моделирования.
3. Разработанная библиотека радиационных и температурных моделей включена в промышленную систему приборно-технологического моделирования Sentaurus Synopsys TCAD и используется для проектирования различных конструкторско-

технологических разновидностей МОП-транзисторов, составляющих основу радиационно-стойких и высокотемпературных КМОП КНИ БИС.

4. Разработан квази-трехмерный подход к расчету ВАХ и радиационных токов утечки в субмикронных КНИ МОПТ структурах, позволяющий существенно упростить расчет тока утечки вдоль третьей координаты Z и уменьшить время расчета в 9 раз, за счет введения в модель МОПТ структуры фиктивного паразитного транзистора со сверхузким каналом на границе Si/SiO_2 STI-изоляции.
5. Разработаны маршруты TCAD моделирования электрических характеристик МОП-транзисторов с учетом влияния:
 - радиационных эффектов, обусловленных влиянием нейтронов, гамма лучей, протонов;
 - высоких и низких температур, эффекта саморазогрева;
 - совместно радиационных и температурных эффектов.
6. Разработаны радиационные и температурные TCAD модели следующих конструктивно-технологических разновидностей глубоко субмикронных КНИ МОПТ структур:
 - с high-k диэлектриком затвора на основе оксида гафния (HfO_2);
 - со встроенной областью собственной проводимости в канале;
 - со скрытым оксидом на основе материалов с высокой теплопроводностью:
 - 1) Al_2O_3 (alumina) – оксид алюминия;
 - 2) AlN – нитрид алюминия;
 - 3) Si_3N_4 – нитрид кремния;
 - 4) Активный слой кремния, окруженный «поясом» AlN .
 - с различной конфигурацией скрытого оксида на основе оксида кремния (SiO_2):
 - 1) SELBOX – с «окном» в скрытом оксиде;
 - 2) Partial SOI – со скрытым оксидом, перекрывающим только половину МОПТ структуры;
 - 3) Quasi SOI – с L-образными слоями скрытого оксида под стоком и истоком;
 - 4) UTB (Ultra-Thin BOX), $t_{\text{BOX}} = 10$ нм;
 - 5) UTBB (Ultra-Thin BOX and Body), $t_{\text{BOX}} = 6$ нм, $t_{\text{ch}} = 25$ нм;

б) Double SOI – со слоем кремния, встроенным в скрытый оксид.

Погрешность моделирования электрических характеристик рассматриваемых структур, составляет до 10–15% для статических ВАХ и до 15–20% для динамических характеристик в широком диапазоне доз и потоков радиации.

Основные практические результаты диссертации:

Разработанная библиотека радиационных и температурных моделей включена в промышленную систему приборно-технологического моделирования Sentaurus Synopsys TCAD и предназначена для проектирования различных конструкторско-технологических разновидностей МОП-транзисторов, составляющих основу радиационно-стойких и высокотемпературных КМОП КНИ БИС.

Внедрение результатов работы.

Результаты диссертации были использованы на предприятиях филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова», ДЦ «ПМС» МИЭТ, ФГБНУ «НИИ ПМТ» при выполнении пяти х/д НИР за 2012-2015 года, а также при выполнении семи госбюджетных НИР за 2012-2020 года по программам ФЦП, научного фонда НИУ ВШЭ и грантам РФФИ, в том числе совместного российско-китайского проекта по исследованию и моделированию глубоко субмикронных и нанометровых КМОП структур.

Методические результаты. Ряд результатов, включающих использование TCAD и примеры расчета МОПТ структур и схемных фрагментов на их основе, внедрены в учебный процесс МИЭМ НИУ ВШЭ при чтении следующих дисциплин: «Системы автоматизированного проектирования изделий микро- и наноэлектроники» для магистров обучающихся по программе «Инжиниринг в электронике» Департамента электронной инженерии, «Системы автоматизированного проектирования изделий вычислительной техники» для магистров обучающихся по программе «Компьютерной системы и сети» Департамента компьютерной инженерии и «Перспективные направления мировой и отечественной электроники» для аспирантов школы по техническим наукам Департамента электронной инженерии.

Перечень сокращений

BOX	–	скрытый оксид (Buried Oxide)
DTI	–	глубокая щелевая изоляция (deep trench isolation)
FinFET	–	структура МОП-транзистора с плавником (fin field-effect transistor)
HTCI	–	диэлектрик с высоким коэффициентом теплопроводности (High Thermal Conductivity Insulators)
LET	–	линейные потери энергии (linear energy transfer)
SOI	–	Silicon-On-Insulator
SOS	–	Silicon-On-Sapphire
SPICE	–	Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis
STI	–	мелкощелевая изоляция (shallow trench isolation)
TCAD	–	Technology Computer-Aided Design
UTB	–	сверхтонкий скрытый оксид (ultra thin BOX)
UTBV	–	тонкий карман и тонкий оксид (ultra thin BOX and Body)
БИС	–	большая интегральная схема
ВАХ	–	вольтамперная характеристика
ИС	–	интегральная схема
КМОП	–	комплиментарный металл-оксид-полупроводник
КНИ	–	кремний на изоляторе
КНС	–	кремний на сапфире
МОПТ	–	металл-оксид-полупроводник транзистор
ОЯЧ	–	отдельная ядерная частица
САПР	–	система автоматизированного проектирования
СБИС	–	сверхбольшая интегральная схема

Список использованной литературы

- [1] TCAD Sentaurus User Manual J-2014.09, Synopsys.
- [2] SILVACO TCAD. Simulation Standard. Volume 24. № 4, 2014, [Электронный ресурс]. URL: http://www.silvaco.com/tech_lib_TCAD/simulationstandard/2014/index.html (дата обращения 24.09.2020).
- [3] VisualTCAD [Электронный ресурс], [<https://www.cogenda.com/article/TID>] (дата обращения 24.09.2020).
- [4] Leray J. L. Total Dose Effects: Modeling for Present and Future // IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference (NSREC) Short Course, 1999, P. 115.
- [5] Peng C., Hu Z., Ning B., Dai L., Bi D., Zhang Z. Radiation-enhanced gate-induced-drain-leakage current in the 130 nm partially-depleted SOI pMOSFET // Solid-State Electronics, 106 (2015), P. 81–86.
- [6] Sanchez Esqueda I., Barnaby H. J., King M. P. Compact Modeling of Total Ionizing Dose and Aging Effects in MOS Technologies // IEEE Transactions On Nuclear Science, 2015, Vol. 62, Issue 4, P. 1501-1515.
- [7] Xie X., Zhu H., Zhang M. Bi D., Hu Z., Zhang Z., Zou S. Radiation-enhanced channel length modulation induced by trapped charges in buried oxide layer // IEICE Electronics Express, 2019, Volume 16, Issue 21, P. 20190454.
- [8] Тихомиров П., Пфеффли П., Боргес Р. Моделирование деградации и обратимых отказов полупроводниковых приборов с использованием TCAD Sentaurus // Электроника (наука, технология, бизнес), №10 (00150) 2015, С. 142-149.
- [9] Чаплыгин Ю.А., Крупкина Т.Ю., Красюков А.Ю., Артамонова Е.А. Приборно-технологическое моделирование элементов интегральной электроники с повышенной стойкостью к внешним воздействиям // Известия вузов. Электроника, Том 21, №2, 2016, С. 139-144.
- [10] Смолин А.А., Согоян А.В., Уланова А.В., Демидов А.А. Моделирование радиационно-индуцированных токов утечки в МОП-структурах при воздействии гамма- и рентгеновского излучений // Проблемы разработки перспективных микро- и нано-электронных систем (МЭС), №3, 2014, С. 197-200.
- [11] Oldham T. R., McLean F. B. Total Ionizing Dose Effects in MOS Oxides and Devices // IEEE Transactions On Nuclear Science, Vol. 50, No. 3, June 2003. P. 483-499.

- [12] Hani Noorashiqin A. M., Kordesch A. V., Rasat Muhamad M. A TCAD Analysis of the Impact of Starting Material Doping on 1.8V CMOS Threshold and Body Effect // In Proc. of 2007 5th Student Conference on Research and Development, Selangor, Malaysia, 2007, P. 1-3.
- [13] Селецкий А.В., Шелепин Н.А., Смолин А.А., Уланова А.В. Исследование влияния разброса технологических параметров СБИС на стойкость к эффектам накопленной дозы радиации с помощью средств приборно-технологического моделирования // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС), №4, 2016, с. 178-183.
- [14] Wang Y., Shan C., Piao W., Li X.-J., Yang J.-Q., Cao F., Yu C.-H. 3D Numerical Simulation of a Z Gate Layout MOSFET for Radiation Tolerance // Micromachines, 2018, 9, 659, P. 1-8.
- [15] Lee M. S., Lee H. C. Dummy Gate-Assisted n-MOSFET Layout for a Radiation-Tolerant Integrated Circuit // IEEE Transactions on Nuclear Science 60 (2013), P. 3084-3091.
- [16] Петросянц К. О., Кожухов М. В., Попов Д. А. Обобщённая TCAD-модель для учёта радиационных эффектов в структурах МОП и биполярных транзисторов // Наноиндустрия, №. S(82), 2018, С. 404-405.
- [17] Петросянц К. О., Попов Д. А., Быков Д. В. TCAD моделирование дозовых радиационных эффектов в суб-100 нм high-k МОП-транзисторных структурах // Известия вузов. Электроника. 2017. Т. 22. № 6. С. 570-581.
- [18] Петросянц К. О., Кожухов М. В., Попов Д. А., Орехов Е. В. Математические модели, встроенные в систему TCAD, для учёта влияния гамма- и нейтронного излучения на полупроводниковые приборы // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2012. № 6 (131). С. 77-82.
- [19] Petrosyants K. O., Popov D. A., Bykov D. V. Quasi-3D TCAD modeling of STI radiation-induced leakage currents in SOI MOSFET structure // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1163. P. 1-6.
- [20] Petrosyants K. O., Kozhukhov M. V., Popov D. A. Radiation- and Temperature-Induced Fault Modeling and Simulation in BiCMOS LSI's Components using RAD-THERM TCAD Subsystem // In Proc. of 2019 IEEE 22nd International Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits & Systems (DDECS). Cluj: IEEE, 2019. P. 1-4.

- [21] Petrosyants K. O., Popov D. A., Bykov D. V. TCAD Simulation of Dose Radiation Effects in Sub-100 nm High-k MOSFET Structures // Russian Microelectronics. 2018. Vol. 47. No. 7. P. 487-493.
- [22] Petrosyants K. O., Popov D. A. TCAD Simulation of Total Ionization Dose Response of 45nm High-K MOSFETs on Bulk Silicon and SOI Substrate // In Proc. of 24th European conference on radiation and its effects on components and systems–2015 (RADECS 2015), Moscow, Russia, 14-18 September. Piscataway: Institute of Electrical and Electronic Engineers, 2015. P. 27-30.
- [23] Kilchytska, V., Alvarado, J., Militaru, O., Berger, G., Flandre, D. Effects of high-energy neutrons on advanced SOI MOSFETs // Advanced Materials Research, Vol. 276, P. 95-105, 2011.
- [24] Consentino G., et al., Dangerous Effects Induced on Power MOSFETs by Terrestrial Neutrons // In Proc. of AEIT Annual Conference 2013, Mondello, Italy, 2013, P. 1-6.
- [25] Abdul Amir H. F., et al. Effects of High Energy Neutrons and Resulting Secondary Charged Particles on the Operation of MOSFETs // In Proc. of International Conference on Computational Science and Technology – 2014 (ICCST'14), Kota Kinabalu, Malaysia, P. 1-6.
- [26] Li Ying, et al. Anomalous radiation effects in fully depleted SOI MOSFETs fabricated on SIMOX // IEEE Transactions on Nuclear Science №48 P. 2146-2151, 2001.
- [27] Petrosyants K. O., Kozhukhov M. V., Popov D. A. Effective Radiation Damage Models for TCAD Simulation of Silicon Bipolar and MOS Transistor and Sensor Structures // Sensors and Transducers. 2018. Vol. 227. No. 11. P. 42-50.
- [28] Petrosyants K. O., Popov D. A., Kozhukhov M. V. General Approach to TCAD Simulation of BJT/HBT and MOSFET Structures after Proton Irradiation // In Proc of 2017 International Workshop on Reliability of Micro- and Nano-Electronic Devices in Harsh Environment” (IWRMN-EDHE 2017). Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, 2017. P. 1-3.
- [29] Petrosyants K. O., Kozhukhov M. V. Physical TCAD model for proton radiation effects in SiGe HBTs // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2016. Vol. 63. No. 4. P. 2016 - 2021.

- [30] Морозов С.А., Соколов С.А. Радиационные эффекты при воздействии тяжелых заряженных частиц КНИ СБИС и способы их моделирования // Труды научно-исследовательского института системных исследований российской академии наук.
- [31] Biwei L., Shuming C., Bin L. Temperature dependence of charge sharing and MBU sensitivity induced by a heavy ion // *Journal of Semiconductors*. – 2009. – Т. 30. – №. 7. – С. 074005;
- [32] Truyen D., Boch J., Sagnes B., Renaud N., Leduc E., Arnal S., Saigne F. Temperature effect on heavy-ion induced parasitic current on SRAM by device simulation: effect on SEU sensitivity // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. – 2007. – Т. 54. – №. 4. – С. 1025;
- [33] Катунин Ю. В., Стенин В. Я., Оценка на основе TCAD моделирования устойчивости к сбоям элементов на базе ячеек STG DICE для 65-нм кмоп блоков ассоциативной // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС), №4, 2018, с. 182-189.
- [34] Rahou F.Z., Guen Bouazza A., Rahou M. Self- heating effects in SOI MOSFET transistor and Numerical Simulation Using Silvaco Software, // In Proc. Of 24th International Conference on Microelectronics (ICM) 2012.
- [35] Shoucair F.S., Hwang W. Electrical characteristics of large scale integration (LSI) MOSFETs at very high temperatures part II: experiment // *Microelectron Reliab.* 24(3) (1984) 497–510.
- [36] Чаплыгин Ю.А., Крупкина Т.Ю., Красюков А.Ю., Артамонова Е.А. Исследование электрических характеристик КМОП-КНИ- структур с проектными нормами 0.5 мкм для высокотемпературной электроники // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем - 2016. Сборник трудов / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. М.: ИППМ РАН, 2016. Часть IV. С. 10-15.
- [37] Бенедиктов А.С., Игнатов П.В., Горнев Е.С, Компьютерное моделирование и экспериментальные исследования функционирования КНИ МОП-транзисторов при высоких температурах // Труды международной конференции "Микроэлектроника 2015". Интегральные схемы и микроэлектронные модули: проектирование, производство и применение. (Крым, г. Алушта, 28 сентября – 3 октября 2015), С. 239-240.

- [38] Бенедиктов А.С., Горнев Е.С., Потупчик А.Г., Михайлов А.А., Смирнов А.Н. Особенности работы МОП-транзисторов на основе кремниевых структур при высоких температурах // Нанотехнологии. Электроника, №8, 70, 2016, С. 96-103.
- [39] Черных М.И., Цоцорин А.Н., Кожевников В.А. Исследование воздействия высоких температур на электрофизические свойства мощных СВЧ транзисторов с затвором Шоттки на основе карбида кремния // Электроника и микроэлектроника СВЧ, Том: 1, 2015 С. 258-261.
- [40] Kathuria A. Effects of Low-Temperature Operation on the Performance of MOSFETs // PhD Dissertation, Arizona State University, 2010.
- [41] Omura Y., Mallik A., Matsuo N. Low-Power High-Temperature-Operation-Tolerant (HTOT) SOI MOSFET // MOS Devices for Low-Voltage and Low-Energy Applications, 2016, P. 367-380.
- [42] Emam M., Vanhoenacker-Janvier D., Raskin J.-P. High temperature RF behavior of SOI MOSFET transistors for low power low voltage applications // In Proc. of 2010 IEEE International SOI Conference (SOI), San Diego, CA, 2010, P. 1-2.
- [43] Турин В.О., Шадрин И.Ф., Дорофеев А.А., Баландин А.А., Приборно-технологическое моделирование AlGaN/GaN НЕМТ с учетом пьезоэффекта и эффекта саморазогрева // VII-ой региональный семинар «Компьютерное моделирование и проектирование микро- и нанoeлектроники и микроэлектромеханических систем», 2015, С. 1-14.
- [44] Рогов А.П., Турин В.О. Приборно-технологическое моделирование влияния ширины вертикальной части стока кремниевого вертикального ДМОП-транзистора на его выходное сопротивление // VII Региональный семинар «Компьютерное моделирование и проектирование микро- и нанoeлектроники и микроэлектромеханических систем» (МНЭиМС-2015), г. Орёл, 27 марта 2015.
- [45] Kumar U., Ramdopal V. A Novel TCAD-Based Thermal Extraction Approach for Nanoscale FinFETs // IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 64, no. 3, March 2017, P. 1403-1407.
- [46] Burenkov A., Belko V., Lorenz J. Self-heating of Nano-Scale SOI MOSFETs: TCAD and Molecular Dynamics Simulations // In Proc. of IEEE THERMINIC 2013 – 19th International Workshop.

- [47] Liu W., Etessam-Yazdani K., Hussin R., Asheghi M. Modeling and Data for Thermal Conductivity of Ultrathin Single-Crystal SOI Layers at High Temperature // IEEE Transactions On Electron Devices, Vol. 53, No. 8, August 2006, P. 1868-1876;
- [48] Yoo S.-W, Kim H., Kang M., Shin H. Analysis on Self-Heating Effect in 7 nm Node Bulk FinFET Device. // JSTS:Journal of Semiconductor Technology and Science. 16, 2016, P. 204-209.
- [49] Three-dimensional device simulations of 10 nm FinFETs using monte carlo model and drift-diffusion model with ballistic mobility // Solvnet, Synopsys, Mar. 2016.
- [50] Oldham T. R., McLean F.B. Total Ionizing Dose Effects in MOS Oxides and Devices // IEEE Transactions On Nuclear Science, Vol. 50, No. 3, June 2003, P. 483-499.
- [51] Зебрев Г.И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах высокой степени интеграции // НИЯУ МИФИ, 2010.
- [52] Fleetwood D.M. Evolution of Total Ionizing Dose Effects in MOS Devices With Moore's Law Scaling // IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol 65, Issue 8 , Aug. 2018, P. 1465 – 1481.
- [53] Hughart D.R., et al. The Effects of Proton-Defect Interactions on Radiation-Induced Interface-Trap Formation and Annealing // IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 59, Issue 6, Dec. 2012, P. 3087-3092.
- [54] Першенков В.С., Попов В.Д., Шальнов А.В. Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем // М.: Энергоатомиздат, 1988. - С. 256.
- [55] Browning J.S.; Connors M.P.; Freshman C.L.; Finney G.A. Total dose characterization of a CMOS technology at high dose rates and temperatures // IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 35, Dec. 1988, pt. 1, P. 1557-1562.
- [56] Петросянц К.О., Попов Д.А. // Учет влияния температуры на сдвиг порогового напряжения МОП-транзистора в системе TCAD // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2013. № 4. С. 96-97.
- [57] Kolasinski W. A., Koga R., Schnauss E., Duffey J. The effect of elevated temperature on latchup and bit errors in CMOS devices // Aerospace Corp El Segundo Ca Lab Operations, 1989 – №. TR-0086 (6940-05)-22;
- [58] Ewert T., Vestling L., Olsson J. Investigation of the electrical behavior of an asymmetric MOSFET // Microelectronic Engineering №65 (2003), P. 428–438.

- [59] Fei S., Ru H., Jin H., Hua H. A., Xing Z., Yuan W. Y. Optimization of Sub 0.1-um Asymmetric Halo SOI-MOSFET for High Performance Digital Applications // Chinese Journal of Electronics – 2001, Vol.10, No.2, P. 230-233.
- [60] Baek K.-J., Kim J.-K., Kim Y.-S., Na K.-Y. Device Optimization of N-Channel MOSFETs with Lateral Asymmetric Channel Doping Profiles // Transactions on Electrical and Electronic Materials, Vol. 11, No. 1, February 25, 2010, P. 15-19.
- [61] Pavanello M.A., Martino J.A., Flandre D. Graded-channel fully depleted silicon-on-insulator nMOSFET for reducing the parasitic bipolar effects // Solid State Electron., Vol. 44, No. 6, 2000, P. 917–922.
- [62] Pavanello M.A., De Souza M., Ribeiro T.A., Martino J.A., Flandre D. Improved operation of graded-channel SOI nMOSFETs down to liquid helium temperature // Semicond. Sci. Technol. 31 (2016) 114005, P. 1-9.
- [63] Ferhati H., Djeflal F. Graded channel doping junctionless MOSFET: a potential high performance and low power leakage device for nanoelectronic applications // Journal of Computational Electronics, August 2017, P. 1-9.
- [64] Herrmann T., Flachowsky S., Illgen R., Klix W., Stenzel R., Hoentschel J., Feudel T., Horstmann M. Simulation of asymmetric doped high performance SOI-MOSFETS for VLSI CMOS technologies // In Proc. of IEEE Custom Integrated Circuits Conference, CICC 2009, San Jose, California, USA, 13-16 September, 2009.
- [65] Nayfeh H.M., Rovedo N., Bryant A., Narasimha S., Kumar A., Yu X., Su N., Kumar A., Sleight J. W., Robison R. R., Rausch W., Mallela H., Freeman G. Impact of Lateral Asymmetric Channel Doping on 45-nm-Technology N-Type SOI MOSFETs // IEEE Transactions On Electron Devices, Vol. 56, No. 12, December 2009, P. 3097-3105.
- [66] Амирханов А.В., Волков С.И., Глушко А.А., Зинченко Л.А., Макаручук В.В., Шахнов В.А., Юлкин А.С. Алгоритмы оптимизации ретроградного легирования кармана КНИ МОП-транзистора // Микроэлектроника и информатика – 2015. 22-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов. Тезисы докладов. – М.: МИЭТ, 2015, С. 217-218.
- [67] Chaplygin Y.A., Artamonova E.A., Krasnyukov A.Y., Krupkina T.Y. Study of Thermal Effects and Self-Heating Phenomena in Planar Power SOI MOS Transistors // Semiconductors, 2008, Vol. 42, No. 13, P. 1522–1526.

- [68] Chander S., Singh P., Baishya S. Optimization of Direct Tunneling Gate Leakage Current in Ultrathin Gate Oxide FET with High-K Dielectrics // IJRDET, No1, Oct. 2013, P. 24-30.
- [69] Rana A. K., Chand N., Kapoor V. TCAD Based Analysis of Gate Leakage Current for High-k Gate Stack MOSFET // ACEEE Int. Journ. on Communication, Vol. 2, No.1, P. 5-8, Mar. 2011.
- [70] Yadav S., Srivastava A., Rahul J., Kishor K. Jha. TCAD assessment of nonconventional dual insulator double gate MOSFET // In Proc. of Intern. Conf. on Devices, Circuits and Systems (ICDCS 2012), IEEE Xplore. – 2012;
- [71] Shashank N., Singh V., Taube W.R., Nahar R.K. Role of interface charges on high-k based Poly-Si and metal gate nano-scale MOSFETs // J. Nano- Electron. Phys. – 2011. – Vol. 3, N. 1. – P. 937–941.
- [72] Arora R., Fleetwood Z.E., Xia Zhang E., Lourenco N.E., Cressler J.D., Fleetwood D.M., Schrimpf R.D., Sutton A.K., Freeman G., Greene B. Impact of Technology Scaling in sub-100 nm nMOSFETs on Total-Dose Radiation Response and Hot-Carrier Reliability // IEEE Trans. on Nuclear Science, Vol. 61, No.3, P. 1426–1432, 2014.
- [73] Rezzak N. Total ionizing dose effects in advanced CMOS technologies // PhD Dissertation. Vanderbilt Univ., 2012.
- [74] Petrosyants K.O., Kharitonov I.A., Popov D.A. // Coupled TCAD-SPICE Simulation of Parasitic BJT Effect on SOI CMOS SRAM SEU // In Proc. of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'13), 2013. P. 312-315.
- [75] Попов Д. А. TCAD-моделирование субмикронных и нанометровых МОПТ КНИ структур с учётом температуры и радиации // В кн.: Международный форум «Микроэлектроника-2019». Школа молодых ученых. Сборник тезисов. Республика Крым, 23-25 сентября 2019 г. М. : ООО "Спектр", 2019. С. 270-277.
- [76] Petrosyants K. O., Popov D. A. 45nm High-k MOSFETs on Bulk Silicon and SOI Substrates Modeling to Account for Total Dose Effects // In Proc. of 2017 International Workshop on Reliability of Micro- and Nano-Electronic Devices in Harsh Environment” (IWRMN-EDHE 2017). Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, 2017. P. 1-3.
- [77] Петросянц К. О., Харитонов И. А., Попов Д. А. TCAD моделирование радиационно-индуцированных токов утечки стока в КНИ МОПТ при повышенных температурах

- турах // В кн.: Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА: Материалы XV научно-технической конференции, 27-29 сентября 2017. М., Дубна : ОАО НПП «ПУЛЬСАР», 2017. С. 224-226.
- [78] Петросянц К. О., Кожухов М. В., Попов Д. А. Обобщённая TCAD-модель для учёта радиационных эффектов в структурах МОП и биполярных транзисторов // В кн.: Международный форум "Микроэлектроника-2017" 3-я Международная научная конференция "Электронная компонентная база и электронные модули". Республика Крым, г. Алушта, 02-07 октября 2017 г. М.: Техносфера, 2017. С. 344-347.
- [79] Петросянц К. О., Попов Д. А. Моделирование конструктивно-технологических разновидностей КНИ МОП-транзисторов с повышенной радиационной и температурной стойкостью // В кн.: Международной форум "Микроэлектроника-2016". 2-я научная конференция "Интегральные схемы и микроэлектронные модули". М.: Техносфера, 2016. С. 303-308.
- [80] Петросянц К. О., Харитонов И. А., Самбурский Л. М., Попов Д. А., Ихсанов Р. Ш. Моделирование радиационно-стимулированного тиристорного эффекта в инверторе, выполненном по КМОП-технологии // В кн.: 19-ая Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» «СТОЙКОСТЬ-2016». ФГУП "НИИП", 2016. С. 97-98.
- [81] Петросянц К. О., Харитонов И. А., Попов Д. А., Стахин В. Г., Лебедев С. В. Моделирование сбоеустойчивости КМОП КНИ ячеек памяти при воздействии отдельных тяжелых частиц при повышенной температуре (до 300°C) // В кн.: 19-ая Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» «СТОЙКОСТЬ-2016». ФГУП "НИИП", 2016. С. 56-57.
- [82] Петросянц К.О., Попов Д.А. Приборно-технологическое моделирование 45нм high-k МОПТ с учетом воздействия гамма излучения // В кн.: Труды XXV Международной конференции "Радиационная физика твердого тела" (Севастополь, 6-11 июля 2015г.) / Под общ. ред.: Г. Г. Бондаренко; науч. ред.: Г. Г. Бондаренко. ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2015. С. 424-431.
- [83] Попов Д.А. Моделирование воздействия гамма-излучения на МОПТ с high-k материалом // Микроэлектроника и информатика – 2015. 22-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов. Тезисы докладов. – М.: МИЭТ, 2015, С. 100.

- [84] Попов Д.А. Влияние температуры на радиационный сдвиг порогового напряжения МОП-транзистора // Научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов. Тезисы докладов, М.: МИЭМ, 2013, С. 246-248.
- [85] Fleetwood D.M., Rodgers M., Tsetseris L., Zhou X.J., Batyrev I., Wang S., Schrimpf R., Pantelides S.T. Effects of device aging on microelectronics radiation response and reliability // *Microelectronics Reliability* 47(7), P. 1075-1085.
- [86] Petrosyants K. O., Orekhov E. V., Kharitonov I. A., Popov D. A. TCAD analysis of self heating effects in bulk silicon and SOI n-MOSFETs // In Proc. of International Conference “Micro- and Nanoelectronics – 2012” Proceedings of SPIE: ФТИАН, 2012. P. P1-08.
- [87] Petrosyants K. O., Popov D. A. Comparison of Self-heating Effect in SOI MOSFETs with Various Configuration of Buried Oxide // In Proc. of the 2nd International Conference on Microelectronic Devices and Technologies (MicDAT '2019). Barcelona : International Frequency Sensor Association (IFSA), 2019. P. 24-28.
- [88] Петросянц К. О., Попов Д. А., Самбурский Л. М., Исмаил-Заде М. Р., Харитонов И. А. Экспериментальное исследование и моделирование ВАХ субмикронных МОП-транзисторов в диапазоне температуры $-200...+300^{\circ}\text{C}$ // В кн.: XVII Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника, микро- и нанoeлектроника»: 14 - 18 мая 2018 года, г. Суздаль, Россия. М. : НИИСИ РАН, 2018. С. 67-68.
- [89] Лебедев С.В., Петросянц К.О., Попов Д.А., Самбурский Л.М., Стахин В.Г., Харитонов И.А. Моделирование КНИ МОП-транзисторов для высокотемпературных КМОП интегральных схем (до 300°C) // Труды международной конференции "Микроэлектроника 2015". Интегральные схемы и микроэлектронные модули: проектирование, производство и применение. (Крым, г. Алушта, 28 сентября – 3 октября 2015), С. 239-240.
- [90] Попов Д.А. Моделирование тепловых процессов в структуре КМОП КНИ инвертора // Микроэлектроника и информатика – 2013. 20-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов. Тезисы докладов. – М.: МИЭТ, 2013, С. 108.
- [91] Петросянц К.О., Харитонов И.А., Попов Д.А. Применение пакетов программ TCAD и HSPICE для анализа переходных процессов в ячейках КМОП ИС с учетом влияния эффекта саморазогрева // Инновационные информационные технологии: Мате-

- риалы международной научно-практической конференции. Том 3. М.: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2013, С. 451-459.
- [92] Петросянц К. О., Попов Д. А. Моделирование эффекта саморазогрева КНИ МОП-транзистора с различной конфигурацией скрытого оксида // Известия вузов. Электроника. 2018. Т. 23, № 5. С. 521-525.
- [93] Petrosyants, K.O., Popov, D.A. Simulating the Self-Heating Effect for MOSFETs with Various Configurations of Buried Oxide // Russian Microelectronics 2018, Vol. 48, P. 467–469.
- [94] Turowski M. Physics-Based Radiation Effects Analysis and Radiation Hardening // In Proc. of 2017 International Workshop on Reliability of Micro- and Nano-Electronic Devices in Harsh Environment” (IWRMN-EDHE 2017). Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, 2017. P. 1-4.
- [95] Петросянц К. О., Орехов Е. В., Самбурский Л. М., Харитонов И. А., Ятманов А. П. Трехмерное моделирование радиационных токов утечки в субмикронных МОП-транзисторах со структурой кремний-на-изоляторе // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2010. № 2 (82). С. 81-83.
- [96] Petrosyants K.O., Popov D.A., Bykov D.V. Quasi-3D TCAD modeling of STI radiation-induced leakage currents in SOI MOSFET structure // In Proc. of the III International Conference on Computer Simulation in Physics and beyond, 2018, p. 17.
- [97] Anelli G. et al. Radiation tolerant VLSI circuits in standard deep submicron CMOS technologies for the LHC experiments: practical design aspects // IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 46, No. 6, Dec. 1999, P. 1690-1696.
- [98] Daghighi A. Output-Conductance Transition-Free Method for Improving the Radio-Frequency Linearity of Silicon-on-Insulator MOSFET Circuits // Electron Devices, IEEE Transactions on. 61. P. 2257-2263.
- [99] Lee M., Cho S., Lee N., Kim J. Radiation-tolerance analysis of I-gate n-MOSFET according to isolation oxide module in the CMOS bulk process // Microelectronic Engineering, Volume 200, 15 November 2018, P. 45-50.
- [100] Petrosyants K.O., Popov D. A. High-k Gate Stacks Influence on Characteristics of Nano-scale MOSFET Structures // In Proc. of 2nd International Conference on Modeling Identification and Control. MIC 2015 Vol. 119. P.: Atlantis Press, 2015. P. 174-176.

- [101] Попов Д.А. Приборно-технологическое моделирование перспективной конструкции МОП с high-k диэлектриком // Научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов. Тезисы докладов, М.: МИЭМ, 2014, С. 226-228.
- [102] Попов Д.А. Анализ основных параметров 45нм МОПТ с различной конфигурацией подзатворного диэлектрика с помощью САПР TCAD // Научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов. Тезисы докладов, М.: МИЭМ, 2015, С. 279-280.
- [103] Петросянц К.О., Попов Д.А., Самбурский Л.М. Анализ средствами TCAD токов утечки 45-нм МОП транзисторной структуры с high-k диэлектриком // Известия вузов. Электроника. Том 20, №1, 2015, С. 38-43.
- [104] Petrosyants K.O., Popov D.A., Sambursky L. M., Kharitonov I. A. TCAD Leakage Current Analysis of a 45 nm MOSFET Structure with a High-k Dielectric // Russian Microelectronics. 2016. Vol. 45. No. 7. P. 460-463.
- [105] Попов Д.А., Орехов Е.В. Исследование влияние неравномерного легирование канала на основные параметры КНИ МОП-транзистора с длиной канала 0.08 мкм // Тезисы докладов научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов, М., МИЭМ, 2012, С. 340-341.
- [106] Петросянц К.О., Попов Д.А. Исследование с помощью TCAD быстродействия субмикронных МОП-структур с неравномерным легированием канала // В кн.: XVIII Научно-техническая конференция «Электроника, микро- и нанoeлектроника»: 24 – 27 июня 2019 года, г. Суздаль, Россия. НИИСИ РАН, 2019. С. 27-28.
- [107] Mahmoud R., Madathumpadical N., Al-Nashash H. TCAD Simulation and Analysis of Selective Buried Oxide MOSFET Dynamic Power // J. Low Power Electron. Appl. 2019, 9, 29, P. 1-13.
- [108] Narayanan, M. & Al-Nashash, Hasan & Pal, Dipankar & Chandra, Mahesh. (2013). Thermal model of MOSFET with SELBOX structure. Journal of Computational Electronics. 12.
- [109] Wu W., An X., Que T., Zhang X., Shen D., Guo G., Huang R. Investigation of a radiation-hardened quasi-SOI device: performance degradation induced by single ion irradiation // Semiconductor Science and Technology, Vol. 31, No.10, 105009, 2016, P. 1-6.

- [110]Xiao, Han, Yu Tian, Xia An, Ru Qing Huang and Yangyuan Wang, Quasi-SOI MOSFET: a novel architecture combining the advantages of SOI and bulk devices // *Semicond. Sci. Technol.* 20, 2005, P. 925-931.
- [111]Makovejev S., Raskin J.-P., Md Arshad M.K., Flandre D., Olsen S., Andrieu F., Kilchytska V. Impact of self-heating and substrate effects on small-signal output conductance in UTBB SOI MOSFETs // *Solid-State Electronics*, vol. 71, 2012, P. 93-99.
- [112]Huang Y., Li B., Zhao X., Zheng Z., Gao J., Zhang G., Li B., Zhang G., Tang K., Han Z., Luo J. An Effective Method to Compensate Total Ionizing Dose-Induced Degradation on Double-SOI Structure // *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Volume: 65, Issue: 8, Aug. 2018, P. 1532-1539.
- [113]Петросянец К. О., Попов Д. А. Оценка радиационной и температурной стойкости субмикронных МОП КНИ транзисторных структур с различной конфигурацией скрытого оксида // *Научный семинар «Элементная база СБИС: транзисторные структуры»*, 2019, Москва.
- [114]Biegel B. A., Osman M. A., Yu Z. Analysis of aluminum-nitride SOI for high-temperature electronics // *5th HiTEC*, 2000, P. 1-8.
- [115]Komiya K., Kawamoto T., Sato S, Omura Y., Impact of High-k Plug on Self-Heating Effects of SOI MOSFETs // *IEEE Transactions On Electron Devices*, Vol. 51, No. 12, December 2004, P. 2249-2251.
- [116]King M. P., Gong D., Liu C., Liu T., Xiang A. C., Ye J., Schrimpf R. D., Reed R. A., Alles M. L., Fleetwood D. M. Response of a 0.25 μm thin-film silicon-on-sapphire CMOS technology to total ionizing dose // *Journal of Instrumentation* 5(11):C11021 November 2010, P. 1-5.
- [117]Liu T., Gui P., Chen W., Ye J., Yang C.-A., Zhang J., Zhu P., Xiang A. C., Stroynowski R. Total Ionization Dose Effect Studies of a 0.25 μm Silicon-On-Sapphire CMOS Technology // *In Proc. of 9th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems*, Deauville, 2007, P. 1-5.
- [118]Соловьев А. В., Крупкина Т.Ю., Романов А.А. Повышение пробивного напряжения N-МОП транзисторов со структурой кремний-на-сапфире, изготовленных в составе радиационно-стойких КМОП БИС// *Известия ВУЗов. Электроника*. — М.: МИЭТ, 2016. — Т. 21, №6. — С. 583–585.

- [119] Adonin A. S., Petrosyants K. O., Popov D. A. Modeling of the submicron MOSFETs characteristics for UTSi technology // In Proc. of International Conference on Micro- and Nanoelectronics - 2018, ICMNE 2018. ООО “МАКС Пресс”: SPIE, 2018. P. 29-29.
- [120] Petrosyants K. O., Orekhov E. V., Popov D. A., Kharitonov I. A., Sambursky L. M., Yatmanov A., Voevodin A., Mansurov A. TCAD-SPICE simulation of MOSFET switch delay time for different CMOS technologies // In Proc. of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'11) 2011. P. 188-190.
- [121] Adonin A. S., Petrosyants K. O., Popov D. A. Modeling of the Submicron MOSFETs Characteristics for UTSi Technology // Proceedings of SPIE. 2019. Vol. 11022. P. 1-6.
- [122] Barbottin G., Vapaille A. Instabilities in Silicon Devices, New Insulators, Devices and Radiation Effects // Elsevier, 1999.
- [123] Gilard O., Quadri G. Radiation effects on electronics: displacement damages. New Challenges for Radiation Tolerance Assessment // In Proc. of RADECS 2005, P. 47–69, 2005.
- [124] Радиационная стойкость изделий ЭКБ: Научное издание / Под. ред. д-ра техн. наук, проф. А.И. Чумакова. – М.: НИЯУ МИФИ. – 2015. – 512 с.
- [125] Вологдин Э. Н., Лысенко А. П. Интегральные радиационные изменения параметров полупроводниковых материалов // МИЭМ, М. – 1999;
- [126] Зебрев Г.Н. Моделирование дозовых и одиночных радиационных эффектов в кремниевых микро- и нанoeлектронных структурах для целей проектирования и прогнозирования // Диссертация.
- [127] Zhang S. et al. The effects of proton irradiation on SiGe:C HBTs // IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 48, P. 2233–2237, 2001.
- [128] Sutton A. K., et al. A comparison of gamma and proton radiation effects in 200 GHz SiGe HBTs // IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 52, P. 2358–2365, 2005.
- [129] Haugerud B. M., et al. Proton and gamma radiation effects in a new first-generation SiGe HBT technology // Solid State Electron., Vol. 50, P. 181–190, 2006.
- [130] Li Y., et al. Anomalous radiation effects in fully depleted SOI MOSFETs fabricated on SIMOX // IEEE Transactions on Nuclear Science №48 P. 2146-2151, 2001.
- [131] Dentan M. Radiation effects on electronic components and circuits // European Organization for Nuclear Research CERN Training, April 10-12, 2000 “Radiation effects on electronic components and systems for LHC”, First course: Radiation Effects on Electronic Components.

- [132]Gregory B. L. Minority carrier recombination in neutron irradiated silicon // IEEE Trans. on Nucl. Sci., vol. NS16, No. 6, P. 53-62, 1969.
- [133]Вологдин Э.Н., Смирнов Д.С. Эмпирические соотношения для зависимости коэффициента радиационного изменения времени жизни носителей заряда в кремнии при нейтронном облучении от уровня инжекции и степени легирования // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2010, В. 2, С. 17-22.
- [134]Johnston A. H., Plaag R.E. Models for total dose degradation of linear integrated circuits // IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol 34, P. 1474-1480, 1987.
- [135]Peng C., Hu Z. En Y., Chen Y., Lei Z., Zhang Z., Zhang Z., Li B. Radiation Hardening by the Modification of Shallow Trench Isolation Process in Partially-Depleted SOI MOSFETs // IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 65, No. 3, Jan. 2018, P. 877–883.
- [136]Schwank J.R. et al. Radiation Effects in MOS Oxides // IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 45, No. 4, August 2008, P. 1833-1853.
- [137]Shaneyfelt M. R., Dodd P. E., Draper B. L., Flores R. S. Challenges in hardening technologies using shallow-trench isolation // IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 45, No. 6, Dec. 1998, P. 2584–2592.
- [138]Петросянц К.О., Харитонов И.А., Орехов Е.В., Ятманов А.П. Квазитрехмерное приборное моделирование КНИ МОП-структур с учетом стационарного ионизирующего излучения // Электроника, микро- и нанoeлектроника: сб. научн. тр. / Под. ред. Стенина – М.: МИФИ, 2009, С. 241-249.
- [139]Barnaby H.J., McLain M.L., Esqueda I.S., Chen X.J. Modeling Ionizing Radiation Effects in Solid State Materials and CMOS Devices // IEEE Transactions on Circuits and Systems – I: Regular Papers, Vol. 56, No. 8, August 2009, P. 1870-1883.
- [140]Peng C., Hu Z., Zhang Z., Huang H., Ning B., Bi D., Zou Z. A New Method for Extracting the Radiation Induced Trapped Charge Density Along the STI Sidewall in the PDSOI NMOSFETs // IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 60, No. 6, Dec. 2013, P. 4697–4704.
- [141]Bernstein K., Rohrer N. J. SOI Circuit Design Concepts // Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [142]Jenkins K. A., Franch R. L. Impact of self-heating on digital SOI and strained-silicon CMOS circuits // In Proc. of Int. SOI Conf., 2003, P. 161-163.

- [143]Semenov O., Vassighi A., Sachdev M. Impact of self-heating effect on long-term reliability and performance degradation in CMOS circuits // IEEE Trans. on Dev. and Materials Reliab., vol. 6, no. 1, 2006, P. 17-27.
- [144]Takahashi T., Matsuki T., Shinada T., Inoue Y., Uchida K. Comparison of self-heating effect (SHE) in short-channel bulk and ultra-thin BOX SOI MOSFETs: Impacts of doped well, ambient temperature, and SOI/BOX thicknesses on SHE // Electron Devices Meeting (IEDM), 2013, P. 7.4.1-7.4.4.
- [145]Paskov P. P., Slomski M., Leach J. H., Muth J. F., Paskova T. Effect of Si doping on the thermal conductivity of bulk GaN at elevated temperatures – theory and experiment // AIP Advances 7, 095302 (2017), P. 1-15.
- [146]Asheghi M., Kurabayashi K., Kasnavi R., Goodson K. E. Thermal conduction in doped single-crystal silicon films // J. Appl. Phys. Vol. 91, №8 (2002), P. 5079-5088.
- [147]АДОНИН А.С. Патент №2298856, 2004.
- [148]Narayanan M. R., Nashash H. A. Minimization of self-heating in SOI MOSFET devices with SELBOX structure // In Proc. of the 11th International Conference on Advanced Semiconductor Devices & Microsystems, 2016, P. 61-64.
- [149]Cheng J., Zhang B., Li Z. The Total Dose Radiation Hardened MOSFET with Good High-temperature Performance // In Proc. of IEEE ICCAS, 2007, P. 1252-1255.
- [150]Trivedi V. P., Fossum J. G. Nanoscale FD/SOI CMOS: Thick or Thin BOX? // IEEE Electron Device Letters, VOL. 26, №. 1, January 2005, P. 26-28.
- [151]Aulnette C., Schwarzenbach W., Daval N., Bonnin O., Nguyen B.-Y., Mazure C., Maleville C., Cheng K., Ponoth S., Khakifirooz A., Hook T., Doris B. Ultra-Thin SOI for 20nm node and beyond // In Proc. of IEEE International SOI Conference (SOI), Oct. 2011, P. 1-2.
- [152]Oshima K., Cristoloveanu S., Guillaumot B., Iwai H., Deleonibus S. Advanced SOI MOSFETs with buried alumina and ground plane: Self-heating and short-channel effects // Solid-State Electronics 48 (2004), P. 907–917.
- [153]Biegel B.A., Osman M.A., Yu Z. Analysis of aluminum-nitride SOI for high-temperature electronics // In Proc. of HiTEC, June 2000, P. 1-8.
- [154]Roig J., Flores D., Hidalgo S., Vellvehi M., Rebollo J., Millan J. Study of novel techniques for reducing self-heating effects in SOI power LDMOS // Solid-State Electronics 46 (2002), P. 2123–2133.

- [155]Красников Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных транзисторов // М. Техносфера. Часть I, 2002, 416 с.
- [156]Baek K.-J., Kim J.-K., Kim Y.-S., Na K.-Y. Device Optimization of N-Channel MOSFETs with Lateral Asymmetric Channel Doping Profiles // Trans. Electr. Electron. Mater. 11(1) 15 (2010).
- [157]Arora R, et al. Trade-offs between RF performance and total-dose tolerance in 45-nm RF-CMOS // IEEE Transactions on Nuclear Science, 58, P. 2830-2837, 2011.
- [158]Nayfach-Battilana J., Renau J. SOI, Interconnect, Package, and Mainboard Thermal Characterization // In Proc. of the 14th ACM/IEEE International Symposium on Low power Electronics and Design, 2009, P. 327-330.
- [159]Shvetsov-Shilovskiy I., Smolin A., Nekrasov P., Ulanova A., Nikiforov A. The influence of device geometry on the partially depleted SOI transistor TID hardness // Rad. Applic., 2016, Vol. 1, Iss. 1, P. 20-25.
- [160]Tan F., Huang R., An X., Wu W., Feng H., Huang L., Fan J., Zhang X., Wang Y. Total ionizing dose (TID) effect and single event effect (SEE) in quasi-SOI nMOSFETs // Semicond. Sci. Technol. 29 (2014) 015010, P. 1-7.
- [161]Song Z. R., Yu Y. H., Li C. L., Zou S. C., Zhang F. M., Wang X. Tetrahedral amorphous-carbon thin films for silicon-on-insulator application // Appl. Phys. Lett. 80, 743 (2002), P. 743-745.
- [162]Urresti J., Hidalgo S., Flores D., Roig J., Rebollo J., Millan J. Low voltage TVS devices: design and fabrication // IEEE, International Semiconductor Conference, 2002, P. 257-260.
- [163]Dong Y., Chen M., Chen J., Wang X., Wang X., He P., Lin X., Tian L., Li Z. Patterned buried oxide layers under a single MOSFET to improve the device performance // Semicond. Sci. Technol., 19, 2004, P. L25–L28.
- [164]Tian Y., Huang R., Zhang X., Wang Y.Y. A novel nanoscaled device concept: Quasi-SOI MOSFET to eliminate the potential weaknesses of UTB SOI MOSFET // IEEE Trans. Electron Devices, 2005, Vol. 52, Iss. 4 P. 561–568.
- [165]Okuhara H., Usami K., Amano H. A Leakage Current Monitor Circuit Using Silicon on Thin BOX MOSFET for Dynamic Back Gate Bias Control // In Proc. of IEEE 2015 Symposium in Low-Power and High-Speed Chips (COOL CHIPS XVIII), Yokohama, Japan, Apr. 2015, P. 1-2.

- [166] Yamaguchi J., Furuta J., Kobayashi K. A Radiation-Hardened Non-redundant Flip-Flop, Stacked Leveling Critical Charge Flip-Flop in a 65 nm Thin BOX FD-SOI Process // In Proc. of IEEE the 24th European conference on radiation and its effects on components and systems–2015 (RADECS 2015), Moscow, Russia, 14-18 September. Piscataway: Institute of Electrical and Electronic Engineers, 2015. P. 1-4.
- [167] Liu Q., Yagishita A., Loubet N., Khakifirooz A., Kulkarni P., Yamamoto T., et al. Ultra-thin-body and BOX (UTBB) fully depleted (FD) device integration for 22nm node and beyond // In Proc. of Symposium on of VLSI Technology (VLSIT), 2010, P. 61-62.
- [168] García Ferré F., Mairov A., Ceseracciu L., et al. Radiation endurance in Al₂O₃ nanoceramics // Scientific Reports Volume 6, Article number: 33478 (2016), P. 1-9.
- [169] Yano T., Ichikawa K., Akiyoshi M., Tachi Y. Neutron irradiation damage in aluminum oxide and nitride ceramics up to a fluence of 4.2×10^{26} n/m² // Journal of Nuclear Materials Volumes 283–287, Part 2, December 2000, P. 947-951.
- [170] Dolzhenko D. I., Kapralova V. M., Sudar N. T. The Dielectric Properties and Radiation Resistance of Aluminum Oxide Layers Obtained by Atomic Layer Deposition // In Proc. of 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), St. Petersburg, 2018, P. 182-185.
- [171] Dukenbayev K., Kozlovskiy A., Korolkov I., Zdorovets M. (2019). Investigation of radiation resistance of AlN ceramics // Vacuum Volume 159, January 2019, P. 144-151.
- [172] Спиридонов Д. М. Диссертация «Спектрально-кинетические закономерности оптически и термостимулированной люминесценции в облученных структурах нитрида алюминия», ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2014.
- [173] Faccio F., et al. Influence of LDD Spacers and H⁺ Transport on the Total-Ionizing-Dose Response of 65-nm MOSFETs Irradiated to Ultrahigh Doses // In Proc. of IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 65, No. 1, Jan. 2018, P. 164-174.
- [174] Neamen D., Shedd W., Buchanan B. Thin Film Silicon on Silicon Nitride for Radiation Hardened Dielectrically Isolated Misfet's // In Proc. of IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 22, no. 6, Dec. 1975, P. 2203-2207.
- [175] Cheng M. C., Yu F., Jun L., Shen M., Ahmadi G. Steady State and Dynamic Thermal Models For Heat Flow Analysis of Silicon-on-Insulator MOSFETs // Microelectronic Reliability, Vol. 44, №3, P. 381-396, 2004.

- [176]The International Technology Roadmap for Semiconductors [Электронный ресурс]. URL: <https://web.archive.org/web/20151228041321/http://www.itrs.net/> (дата обращения 24.09.2020).
- [177]Wong H., Iwai H. On the scaling issues and high-k replacement of ultrathin gate dielectrics for nanoscale MOS transistors // *Microelectronic Engineering*. – 2006. – Vol. 83. – P. 1867–1904;
- [178]Intel’s Revolutionary 22 nm Transistor Technology // Intel presentation on May, 2011.
- [179]AMD Llano core [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cpu-world.com/Cores/Llano.html> (дата обращения 24.09.2020).
- [180]After Swift Comes Cyclone [Электронный ресурс]. <https://www.anandtech.com/show/7335/the-iphone-5s-review/3> (Дата обращения 24.09.2020).
- [181]Innovating today to power the devices of tomorrow [Электронный ресурс]. URL: <http://www.samsung.com/global/business/semiconductor/foundry/process-technology/32-28nm> (дата обращения 24.09.2020).
- [182]Tadashi F., Yasushi N., Toshifumi T., Kiyotaka I. A new high-k transistor technology implemented in accordance with the 55nm design rule process // *Nec Technical J.* – Vol.1, N. 5. – 2006. – P. 42–46;
- [183]Arora, R et al. Trade-offs between RF performance and total-dose tolerance in 45-nm RF-CMOS // *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 58, P. 2830-2837, 2011.
- [184]Madan A., Verma R., Arora R. et al. The enhanced role of shallow-trench isolation in ionizing radiation damage of 65 nm RF-CMOS on SOI // *IEEE Trans. on Nuclear Science*, 2009, Vol. 56, P. 3256–3261.
- [185]Shashank N., Basak S., Nahar R.K. Design and simulation of nano scale high- K based MOSFETs with poly silicon and metal gate electrodes // *Int. J. of Advanc. in Technology*, 2010, Vol. 1, N. 2, P. 252–261.
- [186]Sharma R.K., Gupta M., Gupta R.S. TCAD assessment of device design technologies for enhanced performance of nanoscale DG MOSFET // *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2011, Vol. 58, N. 9, P. 2936–2943.
- [187]Chaujar R., Kaur R., Saxena M., et al. TCAD assessment of gate electrode workfunction engineered recessed channel (GEWE-RC) MOSFET and its multilayered gate architec-

- ture. Part I: Hot-carrier-reliability evaluation // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2008. – Vol. 55, N. 10. – P. 2601–2613.
- [188]Gusev E.P., Cartier E., Buchanan D.A. et al. Ultrathin high-K metal oxides on silicon: processing, characterization and integration issue // Microelectronic Engineering, Vol. 59, Iss. 1–4, P. 341–349, 2001.
- [189]Zhu W.J., Ma T.P., Zafar S., Tamagawa T. Charge trapping in ultrathin hafnium oxide // IEEE Electron Device Letters, 2002, Vol. 23, Iss. 10, P. 597 – 599.
- [190]Young C. D., Bersuke G., Brown G. A., Lim C., Lysaght P., Zeitzoff P., Murto R. W., Huff H.R. Charge trapping in MOCVD hafnium-based gate field dielectric stack structures and its impact on device performance // In Proc. of IEEE International Integrated Reliability Workshop Final Report, 2003, P. 28-35.
- [191]Miyata N. Study of Direct-Contact HfO₂/Si Interface // Materials, 5, P. 512-527, 2012.
- [192]Guillaumot B., Garros X., Lime F., Oshima K., Tavel B., Chroboczek J. A., Masson P., Truche R., Papon A. M., Martin F., Damlencourt J. F., Maitrejean S., Rivoire M., Leroux C., Cristoloveanu S., Ghibaudo G., Autran J. L., Skotnicki T., Deleonibus S. 75nm Damascene Metal Gate and high-k Integration for Advanced CMOS Devices // IEDM Tech. Dig., P. 355-358, 2002.
- [193]Cheng Y., Ding M., Wu X., Liu X., Wu K. Irradiation Effect of HfO₂ MOS Structure under Gamma-ray // In Proc. of ICSD, Bologna, Italy, 2013, P. 764-767.
- [194]Zhao C. Z., Taylor S., Werner M., Chalker P. R., Potter R. J., Gaskell J. M., Jones A. C. High-k materials and their response to gamma ray radiation // J. Vac. Sci. Technol. B 27 (1), P. 411-415, 2009.
- [195]Ergin F. B., Turan R., Shishiyanyu S. T., Yilmaz E. Effect of Gamma-Radiation on HfO₂ based MOS Capacitor // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, B268, P. 1482-1485, 2010.
- [196]Dixit S. K., Zhou X. J., Schrimpf R. D., Fleetwood D. M., Pantelides S.T., Choi R., Bersuker G., Feldman L. C. Radiation induced charge trapping in ultrathin HfO(2)-based MOSFETs // IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 54, Iss. 6, Dec. 2007, P. 1883-1890.
- [197]Dasgupta A. Radiation response in MOS devices with high-k gate oxides and metal gates // PhD Dissertation, Vanderbilt Univ., 2011.

- [198]Barth M., Liu H. L., Yuan Z., Kumar A., Hughes H., McMarr P. J., Warner J. H., Boos J. B., McMorrow D., Bennett B. R., Narayanan V., Zhang E. X., Zhang C.X., Datta S., Saraswat K. C. Total-Ionizing Dose Mechanisms in Antimony based CMOS Transistors with High-k Dielectric //In Proc. of the 39th Government Microcircuit Applications and Critical Technology Conference (GOMACTech 2014), Charleston, SC, March 2014.
- [199]Xiong K., Robertson J., Gibson M. C., Clark S. J. Defect energy levels in HfO₂ high-dielectric-constant gate oxide // Applied Physics Letters, Vol. 87 Iss. 18, P. 183505, 2005.
- [200]Hamamura H., Ishida T., Mine T., Okuyama Y., Hisamoto D., Shimamoto Y., Kimura S., Torii K. Electron trapping characteristics and scalability of HfO₂ as a trapping layer in SONOS-type flash memories // IEEE International Reliability Physics Symposium, P. 412-416, 2008.
- [201]Liu S. T., Hurst A. L., McMarr P., Benedito J., Capasso C. Total dose radiation response of a 45nm SOI Technology // In Proc. of SOI Conf. (San Diego, USA), 2010, P. 1-2.
- [202]Попов, Д. А. Оптимизация конструкции и технологии изготовления МОП КНС транзистора с неравномерным легированием канала: диплом. работа специалиста / Попов Дмитрий Александрович. – М., 2011 – 108 с.
- [203]«Разработка физических моделей приборного моделирования характеристик субмикронных транзисторов КМОП КНИ с учетом воздействия спецфакторов» (2015 г., 7.43.15.2092).
- [204]«Исследование и разработка радиационных моделей элементов кремний-германиевых аналого-цифровых БиКМОП СБИС для проектирования космической радио- и телекоммуникационной аппаратуры» (2015 г.).
- [205]«Исследование и разработка технологий элементной базы высокотемпературной микро и нанoeлектроники» (2015 г., Соглашение №14.581.21.0007).
- [206]«Разработка методов многоуровневого исследования и моделирования элементов перспективных изделий микроэлектроники от уровня материала до уровня схем с повышенной стойкостью к температурным и радиационным воздействиям» (2013 г., ТЗ-108).
- [207]«Разработка физических моделей приборного моделирования характеристик субмикронных транзисторов КМОП КНИ с учетом воздействия спецфакторов» (2012 г., №29-558/844).

- [208] «Комплексное мультифизическое моделирование базовых конструкций и технологий нового поколения микроминиатюрных, микромошных полупроводниковых фото- и бета-вольтаических элементов питания и сенсоров с длительным сроком службы для автономных медицинских и технических систем различного назначения» (2019 г.).
- [209] «Комплексное моделирование взаимосвязанных электро-тепловых, электромагнитных, фотоэлектрических и радиационных эффектов и явлений в приборах, схемах и системах электроники, микро- и наноэлектроники» (2018 г.).
- [210] «Мультифизическое моделирование полупроводниковых приборов и интегральных схем, работающих в экстремальных условиях» (2018 г.).
- [211] «Разработка методов, моделей и баз данных для проектирования электронных компонентов ЭВМ и РЭА космического назначения (полупроводниковых приборов, микросхем, СБИС, печатных плат) с учетом радиации и температуры» (2014 г.).
- [212] «Исследования характеристик субмикронных и глубоко субмикронных кремний-германиевых биполярных и МОП гетероструктурных транзисторов аналого-цифровых Би-КМОП СБИС для радио- и телекоммуникационных систем» (2012 г.).
- [213] «Поисковые исследования в области СВЧ БИС на основе кремний-германиевых гетероструктур для систем беспроводной связи и радарной техники» (2012 г.).
- [214] «Экспериментальное и теоретическое исследование и моделирование наноразмерных полупроводниковых приборов с учетом влияния различных факторов радиации» совместно РФФИ и Фонд научных исследований Китая (2020 г.).
- [215] Petrosyants K. O., Popov D. A., Li B., Wang Y. TCAD-SPICE Investigation of SEU Sensitivity for SOI and DSOI CMOS SRAM Cells in Temperature Range up to 300°C // In Proc. of the 3rd International Conference on Microelectronic Devices and Technologies (MicDAT'2020), Tenerife, Spain: International Frequency Sensor Association (IFSA), 202. P. 1-4.
- [216] Patterson R. L., et al. Electronic Components for Use in Extreme Temperature Aerospace Applications // 12th International Components for Military and Space Electronics Conference (CMSE 08), San Diego, California, February 11-14, 2008.
- [217] Truyen D., et al. Temperature Effect on Heavy-Ion Induced Parasitic Current on SRAM by Device Simulation: Effect on SEU Sensitivity // IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 54, № 4, 2007, P. 1025-1029.

- [218]Yang H., Li B., Liu B., Shen C., Song Y., Li B., Han Z., Luo J. TCAD Simulation of Total Ionization Dose Response on DSOI nMOSFET // 2nd MOS-AK Workshop, Hangzhou, China June 29-30, 2017.
- [219]Ronald E. R. Application of UTSi® CMOS On Sapphire to RF and Mixed Signal Requirements in Advanced Space Systems // Microwave engineering Europe, 2002, P. 1-4.
- [220]Отчет по НИР «Разработка процедур и методик включения моделей КМОП КНИ элементов в САПР TCAD и SPECTRE с учетом радиационных эффектов», шифр «Модель-МИЭМ». Договор № 29-63 от 19.02.2008 между ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова» и ГУ «НИИ МЭИИТ МИЭМ».

Приложение 1

УТВЕРЖДАЮ

Главный конструктор РФЯЦ-ВНИИЭФ
по микроэлектронике - начальник МВЦ



А.А. Титаренко

2020 г.

АКТ

об использовании результатов кандидатской диссертации Д.А. Попова на тему «Приборно-технологическое моделирование субмикронных МОП-транзисторов со структурой кремний на изоляторе с учетом температурных и радиационных эффектов»

Комиссия в составе:

председателя комиссии: Е.Л. Шоболова – начальника отдела 95-29-2120 филиала РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова»,

членов комиссии:

- А.С. Мокеева – инженера-технолога 2 кат. группы 95-29-2122 филиала РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова», руководителя НИР «Модель-С»,

- А.Н. Мансурова – инженера-технолога 2 кат. группы 95-29-2122 филиала РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова»,

составила настоящий акт в том, что результаты диссертации на тему «Приборно-технологическое моделирование субмикронных МОП-транзисторов со структурой кремний на изоляторе с учетом температурных и радиационных эффектов», полученные в 2011-2012 гг., а именно:

- TCAD модель для математического моделирования п/п приборов и элементов СБИС с учетом температурных эффектов (внутренний саморазогрев и внешняя температура) (итоговый отчет о НИР «Модель-С-МИЭМ-2012» № 844/1);

- TCAD модель для математического моделирования п/п приборов и элементов СБИС с учетом воздействия спецфакторов (итоговый отчет о НИР «Модель-С-МИЭМ-2012» № 844/1),

были использованы в практических работах предприятия (при выполнении НИР «Модель-С») по приборно-технологическому моделированию (ПТМ) и разработке схемотехнических моделей элементов КМОП СБИС КНИ с учетом воздействия спецфакторов и температуры среды, в частности:


- при ПТМ МОП транзисторов КНИ с проектными нормами 0,35 мкм с учетом воздействия спецфакторов и температуры для технологической линии МВЦ (промежуточный отчет о НИР «Модель-С» № 199-293-98/23.06.2011, результаты ПТМ на МНИ № 199-293-036/25.03.2013);

- при разработке компактных SPICE-моделей МОП транзисторов КНИ с учетом воздействия спецфакторов и температуры для проектирования КМОП СБИС КНИ с проектными нормами 0,35 мкм (промежуточный отчет о НИР «Модель-С» № 199-293-067/14.03.2012, SPICE-модели на МНИ № 199-293-158.1/12.11.2013).

Интеграция предложенных физических моделей в систему TCAD Synopsys Sentaurus, позволила существенно расширить возможности САПР приборно-технологического моделирования для проектирования субмикронных п/п приборов и элементов спецстойких СБИС.

СОГЛАСОВАНО

Заместитель начальника МВЦ –
начальник научно-производственного
отделения 95-29-21 филиала
РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС
им. Ю.Е. Седакова»


И.М. Агарков

Председатель комиссии

Начальник отдела 95-29-2120
филиала РФЯЦ-ВНИИЭФ
«НИИИС им. Ю.Е. Седакова»

 Е.Л. Шоболов

Члены комиссии:

Инженер-технолог 2 кат.
группы 95-29-2122 филиала
РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС
им. Ю.Е. Седакова»

 А.С. Мокеев

Инженер-технолог 2 кат.
группы 95-29-2122 филиала
РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС
им. Ю.Е. Седакова»

 А.Н. Мансуров

Приложение 2



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное
автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский
университет «Московский институт
электронной техники»

пл. Шокина, д.1, г. Зеленоград, г. Москва, 124498
 Тел.: +7(499) 731 44 41 Факс: +7(499) 710 22 33
 E-mail: netadm@miet.ru <http://www.miet.ru>
 ОГРН 1027739615584

№ _____
 на № _____

УТВЕРЖДАЮ
 Проректор по научной работе
 МИЭТ



С.А. Гаврилов

«23» 09 2020 г

АКТ

об использовании результатов кандидатской диссертации Д.А. Попова на тему «Приборно-технологическое моделирование субмикронных МОП-транзисторов со структурой кремний на изоляторе с учетом температурных и радиационных эффектов»

Настоящий акт составлен о том, что в период с 2015 по 2017 г.г. в работах Дизайн-центр «Проектирование интегральных микросистем» МИЭТ (ДЦ ПМС МИЭТ) по созданию технологии высокотемпературных (до +300°C) КНИ КМОП ИС и микросистем использованы результаты диссертационной работы Попова Д.А., а именно: высокотемпературная (high-T) TCAD модель КНИ КМОП транзистора, учитывающая специфику приборной структуры для обеспечения надежной работы в режиме повышенных температур: металлизация на основе меди (Cu) и повышенную степень легирования активной области канала; набор физические и полуэмпирические модели для коррекции теплопроводности кремния и при повышенных температурах.

Помимо приведенных выше результатов важное значение имеет то, что предложенные модели встроены в коммерческую версию Synopsys Sentaurus TCAD, что существенно расширяет возможности разработчиков в части моделирования элементной базы КМОП БИС при повышенных температурах (до +300°C).

Директор ДЦ ПМС МИЭТ

Лебедев Сергей Валентинович

030387

Приложение 3

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ»
(ФГБНУ «НИИ ПМТ»)

Юр. адрес: 115054, г. Москва, ул. М. Пионерская, 12. Факт. адрес: 105187, г. Москва, ул. Щербаковская, д. 53
 Тел./факс +7(499)283-90-63, e-mail: niipmt@mail.ru, info@niipmt.ru, web-сайт: www.niipmt.ru
 ИНН/КПП 7705022687 / 770501001, ОГРН 1027739914025, ОКПО 41103195, ОКТМО 45376000, ОКВЭД 72.19, ОКОПФ 75103

Исх. № _____ от _____ 20__ г.

На № _____ от _____ 20__ г.

УТВЕРЖДАЮ
 Врио директора
 ФГБНУ «НИИ ПМТ», к.т.н.

А.В. Мамонтов

20__ г.

АКТ

внедрения результатов кандидатской диссертации Д.А. Попова
 на тему «Приборно-технологическое моделирование субмикронных МОП-
 транзисторов со структурой кремний на изоляторе с учетом температурных и
 радиационных эффектов»

Настоящий акт составлен в том, что в ФГБНУ «НИИ ПМТ» внедрены научные и практические результаты диссертационной работы Попова Д.А., в том числе:

1. библиотека TCAD моделей КНИ КМОП транзисторных структур, учитывающая радиационные воздействия, была использована для оценки влияния гамма излучения на МОП-транзисторы с проектными нормами 0,5 и 0,35 мкм, изготовленные по технологии 5НР и 7НР кремний-германиевых аналого-цифровых БиКМОП СБИС для космической и телекоммуникационной аппаратуры.
2. библиотека TCAD моделей КМОП МОП-транзисторов с размерами канала 0,5-0,18 мкм, учитывающая температурные эффекты, была использована при выполнении НИР по исследованию КМОП КНИ схем экстремальной электроники в расширенной диапазоне температур (от -200 до +300°C).

Практическое использование предложенных Поповым Д.А. моделей, интегрированных в систему TCAD Synopsys Sentaurus, позволило существенно расширить возможности используемой в «НИИ ПМТ» САПР приборно-технологического моделирования элементной базы КМОП и БиКМОП БИС для целей проектирования субмикронных полупроводниковых приборов и элементов специализированных БИС, обладающих повышенной радиационной и температурной стойкостью.

Заместитель директора
 ФГБНУ «НИИ ПМТ»

Смирнова Елена Вячеславовна