

Скупов Антон Владимирович

Моделирование ионно-лучевого легирования гетероструктур «кремний на сапфире» и облучения нейтронами гетероструктур с наноструктурами Ge(Si)

01.04.10 – Физика полупроводников

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2019

Работа выполнена в **филиале федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»** (филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю.Е. Седакова»).

Научный руководитель: **Оболенский Сергей Владимирович**, доктор технических наук, профессор, директор научно-исследовательского радиофизического института федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского).

Официальные оппоненты:

Бутин Валентин Иванович, доктор технических наук, профессор, начальник научно-исследовательского отделения физики излучений – начальник научно-исследовательского отдела теоретической и экспериментальной физики федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова» (ФГУП ВНИИА)

Земляков Валерий Евгеньевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник кафедры квантовой физики и наноэлектроники федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (НИУ МИЭТ).

Ведущая организация: **национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»** (НИЦ «Курчатовский институт»).

Защита состоится 27 ноября 2019 г. в 16.00 на заседании диссертационного совета Д212.166.01 в Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 3, ауд. 227 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте <http://diss.unn.ru/962>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.166.01
кандидат физико-математических наук

Марычев Михаил Олегович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований и степень ее разработанности

В современных приборах микро- и нанoeлектроники применяется широкий спектр гетероструктур, образованных сопряжением материалов с различным кристаллографическим строением и физико-химическими свойствами. На кремнии – основном материале микроэлектроники – были созданы одни из первых гетероструктур «кремний на диэлектрике», в которых подложками служили либо монокристаллический сапфир («кремний на сапфире», КНС), либо аморфный слой диоксида кремния («кремний на изоляторе», КНИ). Применение этих гетероструктур изначально было обусловлено необходимостью обеспечения безотказного функционирования электронной компонентной базы радиоэлектронной аппаратуры, используемой в аэрокосмической технике, атомной энергетике и других отраслях, где требуется радиационная стойкость.

С развитием традиционных и разработкой новых технологий выращивания монокристаллов полупроводниковых соединений, подготовки из них подложек с высококачественной поверхностью, эпитаксиального наращивания гомо- и гетерослоев, легирования и других связано создание нового класса гетероструктур с уникальными физическими свойствами. Именно на гетероструктурах полупроводниковых соединений удалось воспроизводимо наблюдать квантоворазмерные эффекты и практически их реализовать путем формирования квантовых ям, нитей, точек и сверхрешеток. На основе твердых растворов AlGaAs/GaAs, InGaAs/GaAs, InGaAs/AlGaAs, GaN/AlN, Ge/Si созданы сверхвысокочастотные транзисторы, лазеры, фотоприемники и другие активные компоненты, составляющие элементную базу СВЧ-электроники и оптоэлектроники.

Анализ объективных причин отказов функционирования дискретных приборов и интегральных схем с гетеропереходами показывает, что основную роль в деградационных процессах играют локализованные вблизи межфазных границ в переходных областях дефекты кристаллической структуры и упругие напряжения. Важно отметить, что такие процессы происходят не только при эксплуатации в экстремальных условиях, но и во время проведения технологических радиационных воздействий, например, ионно-плазменном осаждении или травлении, ионно-лучевом легировании материалов, радиационной отбраковке и других.

Вопрос о том, как повлияет воздействие радиационных потоков на параметры конкретного вида гетеропереходов, на сегодня зачастую решается эмпирическим путем. И при переходе к гетероструктурам другого вида возобновляется вся трудоемкая процедура экспериментальных поисков.

Поэтому актуальны разработка моделей и исследование с их помощью влияния неоднородностей по толщине приборного слоя распределения упругих напряжений и дефектов кристаллической структуры, характерных для гетероструктур, в частности КНС, на протекание радиационно-технологические процессов при изготовлении микросхем на их основе.

Еще сложнее ситуация с оценкой радиационной стойкости наноразмерных гетероструктур, которую пока невозможно прогнозировать из-за отсутствия универсальных моделей деградационных процессов. В настоящее время проводятся исследования в области создания радиационно-стойких оптоэлектронных приборов с многослойными массивами самоформирующихся nanoостровков Ge(Si)/Si(001) в качестве активной среды. Требуется теоретическая интерпретация экспериментальных данных, полученных в ходе исследований изменений параметров таких приборов после радиационных воздействий, и выявление механизмов деградации оптоэлектронных свойств наноразмерных гетероструктур.

Цель и задачи

Цель работы состояла в исследовании с использованием математических моделей влияния реальной структуры эпитаксиальных гетероструктур «кремний на сапфире» на профили пространственного распределения примесей и радиационных дефектов при ионно-лучевом легировании и постимплантационном отжиге, а также моделировании процессов дефектообразования в гетероструктурах с nanoостровками Ge(Si)/Si(001) при нейтронном облучении.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Разработка математических моделей для расчета профилей распределения ионно-имплантируемых примесей и первичных радиационных дефектов в гетероструктурах «кремний на сапфире» с неоднородным по толщине приборного слоя фазовым составом и кристаллическим строением.

2. Разработка математической модели и исследование влияния ростовых дефектов и упругих напряжений на диффузию легирующих примесей при постимплантационном отжиге гетероструктур «кремний на сапфире».

3. Разработка математической модели связи режимов ионно-лучевого легирования и диффузионного отжига при формировании «*p*-кармана» *n*-канального МОП/КНС транзистора с возникающим при воздействии ионизирующих излучений каналом токов утечки по межфазной границе между исток – стоковых областей прибора.

4. Математическое моделирование процессов образования радиационных дефектов, обуславливающих деградацию оптоэлектронных свойств многослойных гетероструктур с самоформирующимися nanoостровками

Ge(Si)/Si(001) после облучения быстрыми нейтронами.

Научная новизна

1. Впервые предложены математические модели для расчета методом Монте-Карло профилей пространственного распределения имплантируемых ионов и первичных радиационных дефектов в гетероструктурах «кремний на сапфире», учитывающие неоднородности фазового состава и кристаллической структуры приборного слоя. Установлено, что переходная область между эпитаксиальным слоем и подложкой способствует перераспределению внедряемых ионов между кремнием и сапфиром. Показано, что наличие слабосвязанных атомов вблизи протяженных ростовых дефектов кристаллической структуры приборного слоя гетероструктур «кремний на сапфире» приводит к возрастанию концентрации образующихся при ионной имплантации радиационных точечных дефектов.

2. Впервые предложена математическая модель для расчета профилей пространственного распределения легирующих примесей при термическом отжиге гетероструктур «кремний на сапфире», комплексно учитывающая влияние на диффузию примесей упругих напряжений и ростовых дефектов кристаллической структуры приборного слоя. Показано, что рассчитанные по предложенной модели значения концентрации легирующих примесей на одном и том же расстоянии от поверхности приборного слоя, отличаются от рассчитанных для совершенного недеформированного кремния при одинаковых режимах ионной имплантации и отжига.

3. Установлено, что образование канала токов утечки между стоком и истоком n -канальных МОП/КНС транзисторов по границе раздела кремний/сапфир зависит от величины заряда радиационных дефектов, образующихся в сапфире при глубоком легировании приборного слоя бором в процессе формирования « p -кармана». В результате воздействия ионизирующих излучений происходит захват положительного заряда на уровни радиационных дефектов, образующихся в сапфире вблизи границы раздела с кремнием. Это приводит к обеднению основными носителями заряда (вплоть до инверсии типа проводимости) приборного слоя вблизи границы раздела кремний/сапфир и шунтированию стока и истока транзисторов.

4. Впервые предложена математическая модель и проведены расчеты методом Монте-Карло пространственного распределения первичных радиационных дефектов в многослойных гетероструктурах с самоформирующимися наноостровками Ge(Si)/Si(001) при облучении быстрыми нейтронами. Получена зависимость количества наноостровков, в которых произошло образование радиационных точечных дефектов, от энергии и флюенса нейтронов.

5. Показано, что упругая деформация кристаллической решетки вокруг разупорядоченных областей (кластеров радиационных дефектов), образующихся в полупроводниках при облучении быстрыми нейтронами, на порядок величины меньше, чем определяющие оптоэлектронные свойства nanoостровков деформации, обусловленные рассогласованием параметров кристаллических решеток nanoостровков и окружающего их кремния. Установлена зависимость количества nanoостровков, попадающих в область действия электрических полей разупорядоченных областей, от флюенса нейтронов.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Разработана компьютерная программа для численного моделирования процессов дефектообразования в многослойных многокомпонентных твердотельных гетерокомпозициях с внутренней структурой при движении в их объеме ускоренных ионов («TRIS»). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010617268.

2. Разработана компьютерная программа для комплексного моделирования процессов ионно-лучевого легирования, высокотемпературного отжига и расчета распределения потенциала электрического поля в МОП структурах на основе гетероструктур «кремний на сапфире» с учетом особенностей ее строения и физических свойств.

3. Разработана компьютерная программа для моделирования процессов дефектообразования в многослойных многокомпонентных полупроводниковых гетероструктурах с нановключениями при корпускулярном облучении «TRISQD» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017613086). Разработан, реализован и апробирован в программе «TRISQD» алгоритм расчета методом Монте-Карло пространственного распределения первичных радиационных дефектов в многослойных гетероструктурах с нановключениями в процессе образования каскадов атомных смещений. Вычислительная эффективность алгоритма обеспечивается периодическими граничными условиями для каскадов атомных смещений на границах расчетной области, размеры которой подбираются в соответствии со сформулированным критерием.

4. Рассчитаны профили пространственного распределения легирующих примесей бора и фосфора в гетероструктурах «кремний на сапфире» с толщиной приборного слоя 0,3 мкм, формируемые методом ионной имплантации и высокотемпературного отжига, в режимах, соответствующих технологическим маршрутам изготовления КМОП/КНС БИС. Расчеты проведены по моделям, учитывающим влияние на процессы, происходящие при внедрении ионов переходного слоя вблизи границы кремний/сапфир и

ростовых дефектов кристаллической структуры. Диффузионное перераспределение имплантированных примесей рассчитано по моделям, учитывающим влияние упругих напряжений и ростовых дефектов кристаллической структуры приборного слоя гетероструктур «кремний на сапфире». Рассчитаны формируемые имплантацией ионов кислорода или кремния профили аморфизации приборного слоя гетероструктур «кремний на сапфире», для последующей его твердофазной рекристаллизации, направленной на повышение структурного совершенства.

5. Показано, что образование канала токов утечки по границе раздела кремний/сапфир *n*-канальных МОП/КНС транзисторов при воздействии ионизирующих излучений обусловлено захватом положительного заряда уровнями радиационных дефектов в сапфире. Эти радиационные дефекты образуются в процессе формирования «*p*-кармана» при глубоком легировании приборного слоя толщиной 0,3 мкм ионами бора с энергией 100 кэВ и более.

6. Комплексное использование технологических экспериментов и результатов расчетов позволило оптимизировать режимы ионно-лучевого легирования в технологических маршрутах изготовления КМОП/КНС БИС серий 1825 и 1620 в филиале ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю.Е. Седатова» (до 29.12.2017 ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седатова»). Это обеспечило уменьшение величины статического тока потребления микросхем после воздействия стационарного ионизирующего излучения на два порядка, и увеличение процента выхода годных микросхем по параметру «статический ток потребления» в 5–6 раз.

Степень достоверности результатов

Достоверность представленных теоретических результатов подтверждается их воспроизводимостью, верификацией разработанных компьютерных программ сравнением результатов решения одинаковых тестовых задач с полученными по другим программам, сравнением с известными экспериментальными и теоретическими данными.

Личный вклад соискателя

Автором самостоятельно разработаны компьютерные программы TRIS и TRISQD, программа для комплексного моделирования процессов ионно-лучевого легирования, высокотемпературного отжига и расчета распределения потенциала электрического поля в МОП структурах на основе гетероструктур «кремний на сапфире» с учетом особенностей их строения и физических свойств. В разработке и апробации приведенных в диссертации математических моделей вклад автора является определяющим. Все расчеты и анализ их результатов проведены автором.

Положения, выносимые на защиту

1. Возникающий в процессе формирования методом газовой эпитаксии промышленных гетероструктур «кремний на сапфире» переходный слой вблизи границы раздела кремний/сапфир влияет на профили пространственного распределения ионов, имплантируемых с энергиями достаточными для внедрения в эту область гетероструктуры. Для гетероструктур «кремний на сапфире» с толщиной приборного слоя 0,3 мкм и переходным слоем толщиной 50 нм этот эффект проявляется при энергии имплантации ионов бора – 80 кэВ, фосфора – 180 кэВ, кислорода – 100 кэВ, кремния – 160 кэВ. Ионная имплантация с такими или большими значениями энергии приводит к увеличению ширины переходного слоя за счет внедрения ионов и образования радиационных дефектов в сапфире.

2. Ростовые дефекты кристаллической структуры и упругие напряжения в приборном слое гетероструктур «кремний на сапфире» обуславливают диффузионное перераспределение легирующих примесей. В результате концентрация примеси на одном и том же расстоянии от поверхности приборного слоя отличается от концентрации в совершенном недеформированном кремнии при одних и тех же режимах имплантации и отжига.

3. Канал токов утечки между стоком и истоком *n*-канального МОП/КНС транзистора по границе раздела кремний/сапфир зависит от концентрации захваченного при воздействии ионизирующих излучений заряда радиационных дефектов, образующихся в сапфире при глубоком легировании приборного слоя бором в процессе формирования «*p*-кармана».

4. Показано, что при облучении гетероструктур с многослойными массивами наноструктур Ge(Si)/Si(001) (размерами в плоскости основания 65–75 нм, высотой 10–12 нм и поверхностной плотностью 10^{10} см⁻²) нейтронами с флюенсом 10^{15} см⁻² радиационные точечные дефекты образуются в 3% наноструктур при энергии нейтронов 1 МэВ, и в 18% наноструктур при энергии нейтронов 8 МэВ.

5. Деформации кристаллической решетки, создаваемые разупорядоченными областями (кластерами радиационных дефектов), возникающими при облучении гетероструктур с многослойными массивами наноструктур Ge(Si)/Si(001) быстрыми нейтронами, на порядок величины меньше, чем определяющие оптоэлектронные свойства наноструктур деформации, обусловленные рассогласованием параметров кристаллических решеток наноструктур и окружающего их кремния. Количество наноструктур, попадающих в область действия электрических полей (радиусом 100–150 нм) разупорядоченных областей: 4% от их полного числа в

гетероструктуре при флюенсе нейтронов 10^{14} см^{-2} и увеличивается до 40% при флюенсе 10^{15} см^{-2} .

Апробация работы

1. Основные результаты диссертации были представлены в форме устных и стендовых докладов на следующих международных и российских конференциях: X, XI, XII нижегородских сессиях молодых ученых (естественнонаучные дисциплины); IV, V международных молодежных научно-технических конференциях «Будущее технической науки»; IV конференции «Молодежь в науке»; XIII Всероссийской межвузовской конференции «Микроэлектроника и информатика – 2006»; 6-ой Международной конференции «Рост монокристаллов и тепломассоперенос»; XX Международной конференции по теории переноса; XXXVI, XXXVII, XLIX международных тулиновских конференциях по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами; III российском совещании «Кремний-2006», IV российской конференции «Кремний-2007», VII, VIII Международных конференциях «Кремний-2010», «Кремний-2011»; I, V, VII всероссийских конференциях и школах молодых ученых и специалистов «Физические и физико-химические основы ионной имплантации»; XVIII, XX, XXI международных симпозиумах «Нанопизика и наноплектроника».

2. По теме диссертации опубликовано 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, индексирующихся в международных базах данных Scopus, Web of Science, Chemical Abstracts: «Физика и химия обработки материалов», «Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники», «Поверхность: рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования», «Физика и техника полупроводников».

3. Свидетельства государственной регистрации программ для ЭВМ №2010617268 и №2017613086.

Внедрение научных результатов

Основные научные результаты использованы в нескольких научно-исследовательских работах, выполненных в филиале ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю.Е. Седакова» (до 29.12.2017 ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова»). Полученные при выполнении диссертационного исследования данные использованы для оптимизации режимов ионно-лучевого легирования в технологических маршрутах изготовления КМОП/КНС БИС серий 1825 и 1620 микропроцессорного набора (подтверждено актом внедрения №195-95-30-3220/256 от 24.06.2019).

Структура и объем диссертации

Работа состоит из Введения, 4 глав, Заключения и двух Приложений. Диссертация изложена на 147 страницах, содержит 70 рисунков, 11 таблиц и

список литературы из 196 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснованы актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы.

Раздел 1.1 главы 1 содержит обзор литературных данных о строении и свойствах получаемых методом газофазной эпитаксии промышленных гетероструктур КНС, отличающих его от используемого в микроэлектронике объемного кремния. Это высокая плотность ростовых дефектов кристаллической структуры, фоновые примеси, упругие напряжения, выраженный переходный слой вблизи границы раздела $\text{Si}/\text{Al}_2\text{O}_3$ [Л1–Л3]. Приведено описание методов повышения структурного совершенства и улучшения электрофизических свойств приборного слоя КНС путем его твердофазной или жидкофазной рекристаллизации. В **разделе 1.2 главы 1** приведены литературные данные о радиационных эффектах в наноразмерных гетероструктурах, в том числе и в перспективных для применения в микроэлектронике гетероструктурах с многослойными массивами самоформирующихся nanoостровков $\text{Ge}(\text{Si})/\text{Si}(001)$ [Л4].

Глава 2 посвящена исследованиям с помощью математического моделирования методом Монте-Карло влияния переходного слоя у границы раздела $\text{Si}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (ПС) гетероструктур КНС на параметры профилей пространственного распределения имплантируемых ионов и возникающих при этом радиационных точечных дефектов (ПТД). В **п. 2.1.2** обоснована необходимость разработки оригинальной компьютерной программы TRIS. Приведены основные отличия математических моделей TRIS и широко распространенных программ TRIM/SRIM [Л5], а также результаты верификации TRIS сравнением результатов расчета по ней с экспериментальными и справочными данными, а также расчетами по программам TRIM-91 и SRIM-2013. В **п. 2.1.3** дано описание предлагаемых моделей гетерокомпозиции КНС, учитывающих наличие переходного слоя – рисунок 1. Рассмотрены три варианта модели: первая – ПС состоит из алюмосиликатов (муллита, Al_2SiO_5 , плотность – $3,03 \text{ г/см}^3$, обозначена ПС- Al_2SiO_5), вторая – ПС состоит из аморфного кремния (a-Si, плотность – $2,0 \text{ г/см}^3$, обозначена ПС-aSi), третья – приборный слой кремния кристаллический (без ПС, плотность – $2,33 \text{ г/см}^3$, обозначена ПС-cSi).

В **п. 2.1.4** приведены результаты анализа рассчитанных по программе TRIS параметров профилей пространственного распределения ионов бора с энергией 80 и 100 кэВ (рисунок 2), фосфора с энергией 180 кэВ, кислорода с энергией 100 кэВ и кремния с энергией 160 кэВ в КНС с приборным слоем

толщиной 0,3 мкм, строение которого описывается по предложенным моделям.

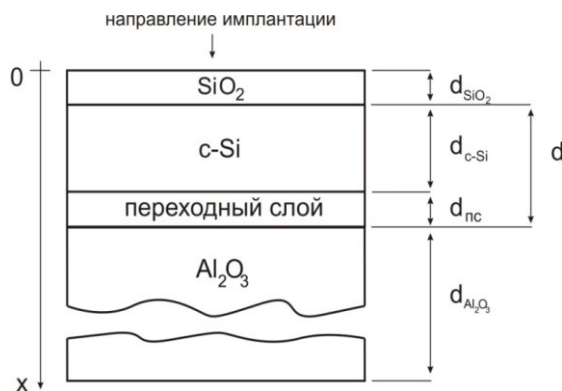
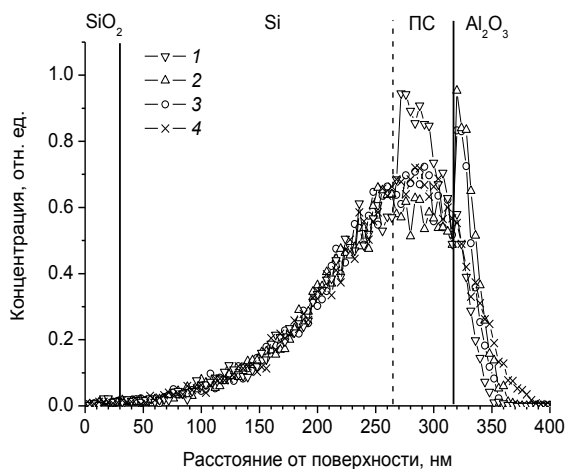
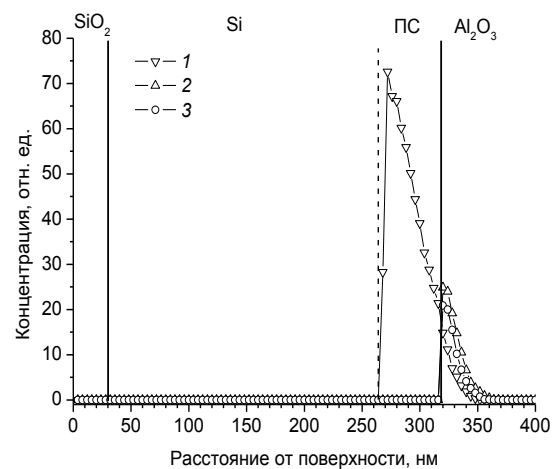


Рисунок 1 – Схематическое изображение моделей строения гетерокомпозиции КНС с переходным слоем (варианты ПС- Al_2SiO_5 , ПС-aSi). ПС-cSi – сплошной слой кремния.



а



б

Рисунок 2 – Рассчитанные профили пространственного распределения внедренных с энергией 80 кэВ ионов бора (а) и образовавшихся при этом вакансий алюминия (б) для разных моделей КНС: 1 – ПС- Al_2SiO_5 , 2 – ПС-aSi, 3 – ПС-cSi. Профиль 4 – в объемном кремнии.

В п. 2.1.5 приведено описание модели гетерокомпозиции КНС, учитывающей влияние ростовых дефектов кристаллической структуры на процессы внедрения ускоренных ионов и образование РТД. Модель основана на предположении о различии значений пороговой энергии смещения атомов (E_d) в структурно совершенном кристалле и в области дефекта с локально высоким уровнем упругих напряжений. В качестве примера рассматривается образование первичных РТД вблизи полной краевой дислокации с вектором Бюргерса $\vec{b} = a/2 \langle 110 \rangle$ (a – постоянная решетки кремния). Модель реализована в программе TRIS. В п. 2.1.6 приведены профили пространственного распределения РТД, возникающих при имплантации в КНС ионов бора с энергиями 30 и 80 кэВ и фосфора с энергиями 60 и 180 кэВ, рассчитанные с учетом ростовых дефектов по предложенной модели. Отличие

концентрации РТД на одном и том же расстоянии от облучаемой поверхности, по сравнению с результатами расчета без учета ростовых дефектов, может составлять 20% и более. Установлено также, что средние проецированные пробеги ионов отличаются от рассчитанных без учета ростовых дефектов менее чем на 5%.

В п. 2.2 приведены результаты исследования методом математического моделирования процесса аморфизации приборного слоя КНС имплантацией ионов кислорода или кремния в режимах, предложенных для создания отечественных гетероструктур КНС с ультратонким приборным слоем [Л6, Л7]. Возникающий при газофазной эпитаксии промышленных гетероструктур КНС переходный слой, состоящий из аморфного кремния или алюмосиликатов, будет препятствовать получению структурно совершенного приборного слоя рекристаллизацией от гетерограницы, так как не может служить качественной затравкой. Обнаруженное в [Л7] повышение совершенства кристаллической структуры КНС можно объяснить рекристаллизацией от приповерхностного слоя кремния протяженностью 50–80 нм, который, как показали результаты моделирования, сохраняется при дозах имплантации кремния $(7,5-8,5) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

В п. 2.3 сформулированы выводы ко второй главе.

Глава 3 посвящена математическому моделированию диффузионных процессов в КНС и анализу влияния режимов ионно-лучевого легирования «*p*-карманов» на образование канала токов утечки *n*-канальных МОП/КНС транзисторов вблизи границы раздела Si/Al₂O₃. В п. 3.2 приводится описание модели диффузии легирующих примесей в КНС, учитывающей влияние ростовых дефектов кристаллической структуры, упругих напряжений и наличия двух границ раздела фаз SiO₂/Si и Si/Al₂O₃. Для расчета профиля концентрации примеси $C(x, t)$, формирующегося в результате ионной имплантации и высокотемпературного постимплантационного отжига КНС, решалась следующая система уравнений:

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{\text{eff}}(x) \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} \right), \quad \frac{\partial C(0, t)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial C(d, t)}{\partial x} = 0, \quad C(x, 0) = C_{\text{ии}}(x) \quad (1).$$

$$D_{\text{eff}}(x) = D_v + \pi r_0^2 N_d(x) D_d, \quad D_v = D_{v0} \exp \left(-\frac{E_a^v \pm \Omega \sigma(x)}{k_B T} \right), \quad D_d(T) = D_{d0} \exp(-E_a^d / k_B T)$$

Здесь $D_{\text{eff}}(x)$ – эффективный коэффициент диффузии примеси [Л8], D_v – коэффициент диффузии примеси в объемном бездислокационном кремнии, D_d – коэффициент диффузии примеси по дислокациям, выступающим как пути ускоренной диффузии, D_0^v , D_0^d , E_a^v , E_a^d – параметры коэффициентов диффузии, r_0 – радиус «дислокационной трубки» (1–30 нм [Л8]) $N_d(x)$ – концентрация дислокаций на расстоянии x от поверхности кремния, $\sigma(x)$ – амплитуда упругих напряжений, Ω – коэффициент пропорциональности, численно равный

активационному объему, $\Omega \approx (N_{\text{at}})^{-1}$, N_{at} – концентрация атомов для кремния ($N_{\text{at}} = 5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$), d – толщина приборного слоя КНС, $C_{\text{ии}}(x)$ – начальное распределение примеси (рассчитывались по программе TRIS), k_B – постоянная Больцмана, T – температура диффузии. Значения параметров [Л8]: для бора $D_0^v = 5,1 \text{ см}^2/\text{с}$, $E_a^v = 3,48 \text{ эВ}$, $D_0^d = 190 \text{ см}^2/\text{с}$, $E_a^d = 3,29 \text{ эВ}$, для фосфора $D_0^v = 10,5 \text{ см}^2/\text{с}$, $E_a^v = 3,68 \text{ эВ}$, $D_0^d = 1,1 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{с}$, $E_a^d = 3,43 \text{ эВ}$. В предложенной модели неоднородность физических свойств КНС $\sigma(x)$, $N_d(x)$ описывалась зависимостью вида $A(x) = A_0 \exp(x/x_0)$, параметры A_0 и x_0 , которой определялись по экспериментальным данным. Для $N_d(x)$: $N_{d0} = 10^2 \text{ см}^{-2}$, $x_0 = 65,1 \text{ нм}$, для $\sigma(x)$: $\sigma_0 = 0,8 \text{ ГПа}$, $x_0 = 176 \text{ нм}$. Коэффициент диффузии примесей по этой модели обозначен $D_{\text{eff}}(x) = D(N_d(x), \sigma(x))$. Рассмотрены также известные из литературы зависимости $N_d(x)$, полученные в работах [Л9, Л10] аппроксимацией экспериментальных данных. На рисунке 3 представлены зависимости $D_{\text{eff}}(x)$ для атомов бора.

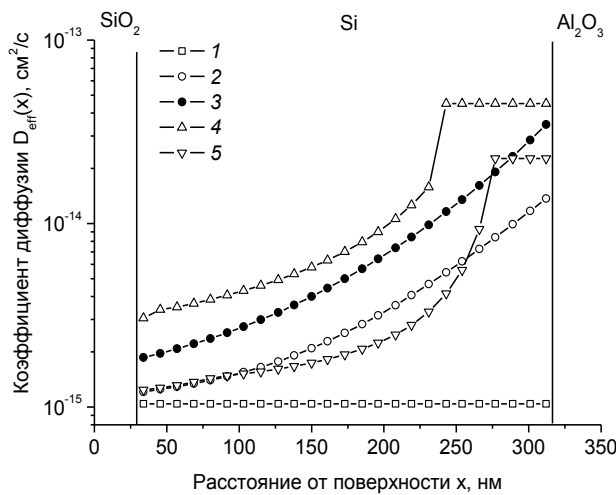


Рисунок 3 – Коэффициенты диффузии бора при 850°C в объемном кремнии 1 – $D_{\text{eff}}(x) = D_{V-\text{Si}}$, и в КНС: 2 – $D_{\text{eff}}(x) = D(N_d(x), \sigma(x) = 0)$, 3 – $D_{\text{eff}}(x) = D(N_d(x), \sigma(x))$, 4 – $D_{\text{eff}}(x)$ рассчитан с $N_d(x)$ из [Л9], 5 – $D_{\text{eff}}(x)$ рассчитан с $N_d(x)$ из [Л10]

В п. 3.3 приводятся результаты расчета численным решением системы (1) профилей $C(x)$ атомов бора в « p -кармане» n -канального МОП/КНС транзистора в режимах, рассматривавшихся для использования в технологическом маршруте изготовления БИС. Варьировалась начальная энергия ионов бора при глубоком легировании приборного слоя: 80, 100, 120 кэВ. Профили $C_{\text{ии}}(x)$ представлены на рисунке 4, профили $C(x)$ – на рисунке 5. Из рисунка 5 видно, что высокая плотность ростовых дефектов и упругие напряжения в КНС, учитываемые по предложенной модели, обуславливают отличие концентрации бора в « p -кармане» n -канальных МОП транзисторов на одном и том же расстоянии от поверхности приборного слоя в 1,4 раза, по сравнению с результатами расчета без учета этих факторов. Для ионов фосфора при формировании стоковых и истоковых областей МОП транзисторов отличие составляет более 1,5 раз.

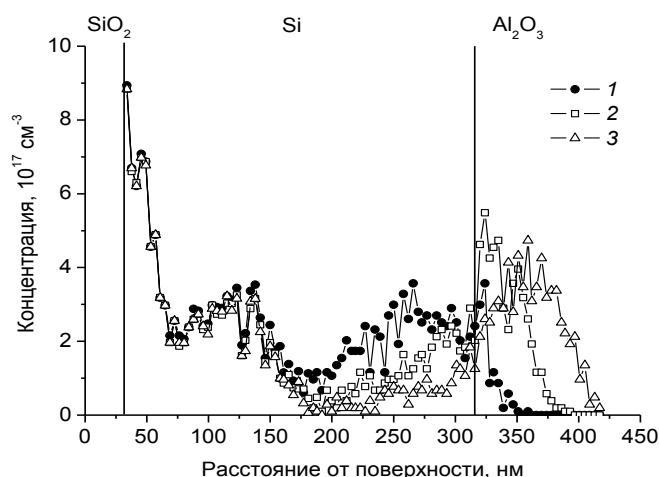
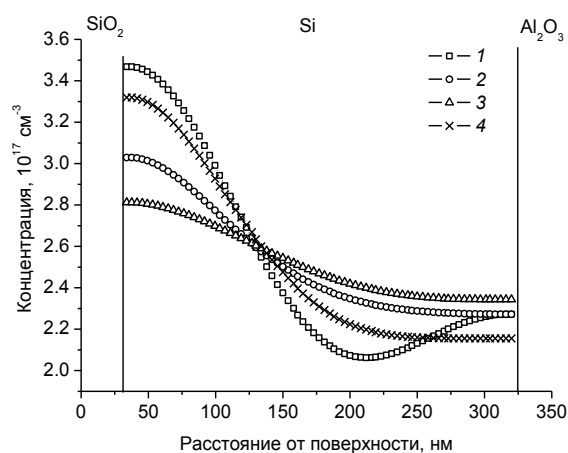
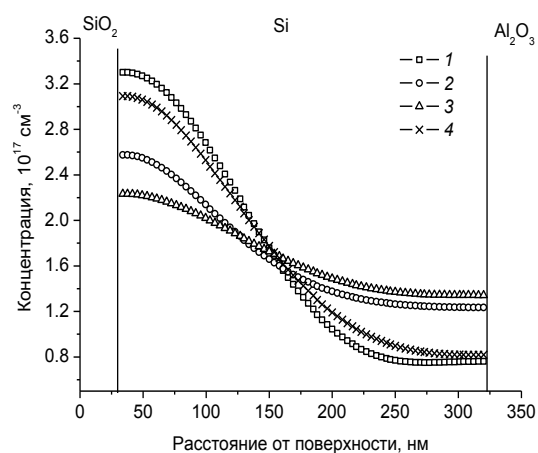


Рисунок 4 – Профили пространственного распределения имплантированных ионов бора в «*p*-кармане» рассчитанные по программе TRIS. Глубокое легирование с начальной энергией ионов 80 (1), 100 (2), 120 (3) кэВ



а



б

Рисунок 5 – Профили пространственного распределения атомов бора в «*p*-кармане», полученные последовательной имплантацией ионов с энергиями 9, 30, 80 (а) и 120 (б) кэВ, после отжига (850°C, 300 минут) для четырех зависимостей $D_{\text{eff}}(x)$ в КНС: 1 – $D_{\text{eff}}(x) = D_{V-Si}$, 2 – $D_{\text{eff}}(x) = D(N_d(x), \sigma(x))$, 3 – $D_{\text{eff}}(x)$ рассчитан с $N_d(x)$ из [Л10], 4 – $D_{\text{eff}}(x)$ рассчитан с $N_d(x)$ из [Л9]

В п. 3.4 приведены результаты математического моделирования влияния режимов ионно-лучевого легирования «*p*-кармана» на образование канала утечки МОП/КНС транзисторов вблизи границы Si/Al₂O₃. На рисунке 4 показано, что при глубоком легировании «*p*-кармана» может происходить внедрение ионов бора в сапфир, сопровождающееся образованием радиационных дефектов. Предположено, что дефекты в сапфине полностью не отжигаются при последующих высокотемпературных операциях, а при воздействии ионизирующих излучений захватывают заряд (преимущественно положительный), что приводит к обеднению «*p*-кармана» вблизи гетерограницы основными носителями (дырками) и образованию проводящего

канала между стоком и истоком МОП транзисторов. В результате возрастают токи утечки КМОП/КНС БИС, что наблюдается экспериментально [Л11, Л12]. Для количественной оценки принято, что один заряженный радиационный дефект в сапфире связан с внедренным в процессе имплантации атомом бора. Тогда приведенный к единице площади поверхности объемный заряд в сапфире можно вычислить по формуле:

$$Q_{SA} = q(x_2 - x_1) \int_{x_1}^{x_2} C_{ии}(x) dx \quad (4).$$

Здесь x_1 – координата границы раздела Si/Al₂O₃, x_2 – координата плоскости параллельной границе раздела Si/Al₂O₃ в сапфире, для которой $C_{ии}(x > x_2) = 0$, $C_{ии}(x)$ – рассчитанная концентрация имплантированных атомов бора на расстоянии x от облучаемой поверхности КНС (рисунок 4). Таким образом, рассчитанные по формуле (4) значения Q_{SA} для начальной энергии ионов бора при глубоком легировании составляют: 80 кэВ – $Q_{SA} = 5,0 \cdot 10^{-8}$ Кл/см², 100 кэВ – $Q_{SA} = 2,8 \cdot 10^{-7}$ Кл/см², 120 кэВ – $Q_{SA} = 4,3 \cdot 10^{-7}$ Кл/см².

Решением одномерного уравнения Пуассона методом конечных разностей после его линеаризации по схеме Гуммеля для трехслойной структуры SiO₂/Si/Al₂O₃ [Л13] получены профили изменения потенциала электрического поля и концентрации электронов и дырок в «*p*-кармане» – рисунки 6 и 7. Учитывались поверхностные плотности заряда на границах SiO₂/Si (Q_{ss1}) и Si/Al₂O₃ (Q_{ss2}) и заряд Q_{SA} . Профили легирования $C(x)$ приборного слоя бором рассчитывались решением (1) для различных зависимостей $D_{eff}(x)$. Из рисунка 6 видно, что область с инверсным типом проводимости возникает у границы раздела Si/Al₂O₃ в случаях глубокого легирования приборного слоя ионами бора с начальной энергией 100 и 120 кэВ, и не возникает при начальной энергии 80 кэВ. То есть при таких энергиях имплантации бора 100 и 120 кэВ величина образующегося в сапфире заряда и уровень легирования «*p*-кармана» достаточны для инверсии типа проводимости кремния и формирования канала утечки между стоком и истоком транзисторов. Из рисунка 7 видно, что модель диффузии бора в процессе постимплантационного отжига слабо влияет на результаты расчета распределения потенциала электрического поля в «*p*-кармане» (а также на зависящие от него распределения концентрации носителей заряда).

В п. 3.5 приведены результаты технологического эксперимента по оптимизации режимов операций ионно-лучевого легирования технологического процесса изготовления КМОП/КНС БИС (топологического аналога БИС 1825ВА3) с использованием приведенных выше результатов их моделирования [Л12]. Возрастание токов утечки микросхем после воздействия стационарного ионизирующего излучения проявляется в увеличении их статического тока

потребления (I_{cc}). Установлено, что после воздействия стационарного ионизирующего излучения среднее по партии значение I_{cc} микросхем, глубокое легирование « p -карманов» которых проводилось имплантацией бора с энергией 80 кэВ, на 1–2 порядка меньше, чем среднее по партии значение I_{cc} микросхем, « p -карманы» которых формировались имплантацией бора с энергией 100 и 120 кэВ [Л12]. Модификация технологического маршрута с учетом обнаруженных эффектов позволила повысить процент выхода годных микросхем по параметру «статический ток потребления» после воздействия стационарного ионизирующего излучения в 5–6 раз.

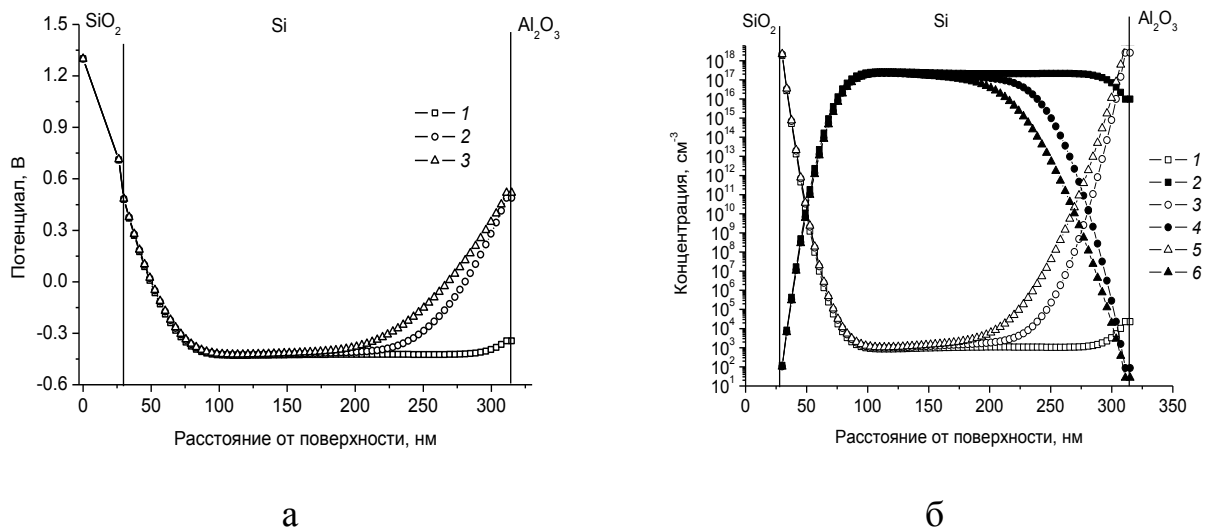


Рисунок 6 – Рассчитанные профили изменения потенциала электрического поля (а) и концентрации носителей заряда (б) в « p -кармане» МОП/КНС структуры при подаче на затвор порогового напряжения ($V_{g1} = 1,3$ В) для начальных энергий имплантации бора при глубоком легировании 80 кэВ (1), 100 кэВ (2), 120 кэВ (3) и соответствующих значений Q_{SA} . Распределение электронов (1, 3, 5) и дырок (2, 4, 6) при глубоком легировании с энергиями, кэВ: 80 (1, 2), 100 (3, 4), 120 (5, 6). $Q_{ss2} = 0,8 \cdot 10^{-7}$ Кл/см²

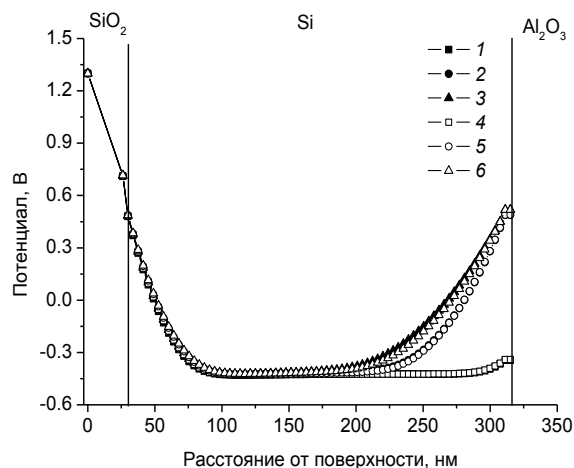


Рисунок 7 – Рассчитанные профили изменения потенциала электрического поля в « p -кармане» МОП/КНС структуры при подаче на затвор порогового напряжения для начальных энергий имплантации бора при глубоком легировании, кэВ: 80 (1, 4), 100 (2, 5), 120 (3, 6). Модель диффузии бора в КНС: $D_{eff}(x) = D_{V-Si} - 1, 2, 3$; $D_{eff}(x) = D(N_d(x), \sigma(x)) - 4, 5, 6$. $Q_{ss2} = 0,8 \cdot 10^{-7}$ Кл/см²

В п. 3.6 сформулированы выводы к третьей главе.

В Главе 4 приведены результаты теоретического исследования процессов образования радиационных дефектов в гетероструктурах с самоформирующимися наноструктурами Ge(Si)/Si(001) в каскадах атомных смещений, вызванных облучением быстрыми нейтронами. В п. 4.1 сформулированы три гипотезы о причинах изменения оптоэлектронных свойств многослойных массивов наноструктур Ge(Si) при облучении. Первая из них основана на предположении, что деградация спектров фото- и электролюминесценции (ФЛ и ЭЛ) массивов наноструктур Ge(Si), обнаруженная в [Л4], происходит в результате каскадного перемешивания атомов Ge и Si на гетерограницах наноструктур/спейсерный слой кремния и/или их радиационно-стимулированной диффузии. Вторая гипотеза, развивающая сформулированные в [Л4] предположения, учитывает, что характерные размеры каскадов атомных смещений при облучении нейтронами превышают размеры наноструктур Ge(Si) и среднее расстояние между ними в многослойных массивах, в результате один каскад может попадать в несколько наноструктур и создавать радиационные дефекты в каждом из них. Третья гипотеза заключается в том, что деградация оптоэлектронных свойств наноструктур Ge(Si)/Si(001) происходит под действием упругих напряжений и электрических полей, создаваемых разупорядоченными областями (РО) – трехмерными кластерами радиационных дефектов.

В п. 4.2 дано описание программы TRISQD, реализующей алгоритм моделирования методом Монте-Карло процессов образования РТД в многослойных гетерокомпозициях с массивами линзообразных нановключений с отличающимися от окружающего материала химическим составом, плотностью, пороговой энергией смещения атомов.

В п. 4.3 приведены результаты математического моделирования по программе TRISQD развития каскада атомных смещений, инициированного первичным атомом отдачи Si с энергией 67, 134, 268 кэВ (соответствует энергии нейтронов 1, 2, 4 МэВ) и точкой старта, расположенной на расстояниях 50, 140, 330 нм от вершины одиночного наноструктура Ge(Si). Результаты моделирования показали, что попавшие в объем наноструктура каскады атомных смещений, не вызывают существенного каскадного перемешивания на гетерогранице наноструктур/спейсерный слой.

В п. 4.4 приведены результаты математического моделирования по программе TRISQD процессов образования РТД в $p-i-n$ -диодах со встроенным многослойным массивом наноструктур Ge(Si), исследовавшихся в [Л4]. Начальные энергии образующих каскады атомных смещений атомов отдачи Si соответствовали энергиям нейтронов из интервала 0,1–8,0 МэВ. По результатам

моделирования оценивалось среднее число наноструктур, где образовались РТД в расчете на один каскад атомных смещений. Доля таких наноструктур составляет около 3% от их полного числа в массиве при плотностях каскадов, соответствующих флюенсам нейтронов $F_n = 10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-2}$. В то же время более 94% всех РТД локализованы в объеме p -, n -, i -областей диода и разделяющих слои наноструктур Ge(Si) слоях кремния.

В п. 4.5 приведены результаты анализа влияния РО на оптоэлектронные свойства гетероструктур с наноструктурами Ge(Si). В п. 4.5.1 приведены оценки концентрации наноструктур Ge(Si) в гетероконструкциях из работ [Л4, Л14] (таблица 1). Средняя концентрация РО (N_{DR}), возникающих при $F_n = 10^{11} - 10^{15} \text{ см}^{-2}$, представлена на рисунке 8. Из приведенных данных видно, что N_{DR} при $F_n = 10^{13} - 10^{15} \text{ см}^{-2}$ более чем на порядок величины меньше, чем концентрация наноструктур в рассматриваемых гетероструктурах. Поэтому возникновение РО в объеме наноструктур, приводящее к деградации их оптоэлектронных свойств, маловероятно.

Таблица 1 – Параметры массивов наноструктур приборных гетероструктур [Л4, Л14]

Поверхностная плотность наноструктур (N_s), см^{-2}	Число слоев (n_l)	Толщина гетероструктуры (d_h), нм	Концентрация наноструктур (N_{is}), см^{-3}	Среднее расстояние между наноструктурами (L_{is}), нм
$3 \cdot 10^{11}$	36	$1,1 \cdot 10^3$	$9,8 \cdot 10^{16}$	22
10^{10}	20	$6,4 \cdot 10^3$	$3,1 \cdot 10^{15}$	68
10^9	20	$6,4 \cdot 10^3$	$3,1 \cdot 10^{14}$	147

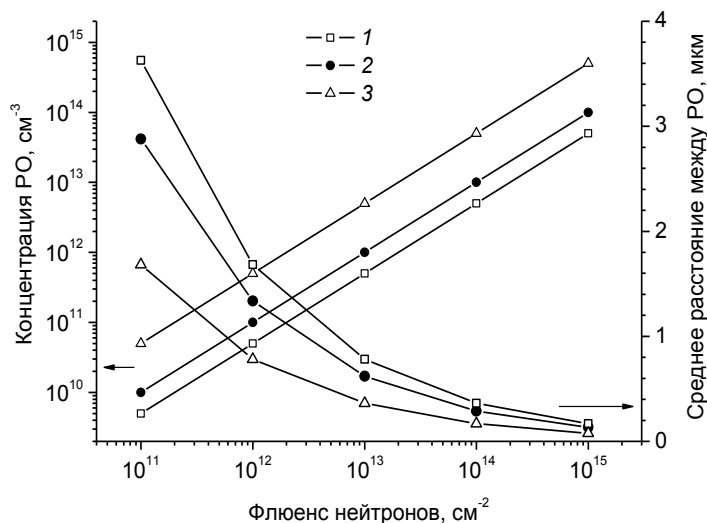


Рисунок 8 – Зависимости средней концентрации РО (N_{DR}) и среднего расстояния (L_{DR}) между ними от флюенса нейтронов для сечений их взаимодействия с ядрами атомов кремния, бары: 1 – 1, 2 – 2, 3 – 10

В п. 4.5.2 приведены результаты расчета амплитуды упругих деформаций

кристаллической решетки, создаваемых РО, и проведено сравнение ее с деформациями от наностроек Ge(Si). Компоненты тензора деформаций от РО получены из решения задачи о распределении напряжений по толщине шарового слоя, внутри которого действует давление P_1 , а снаружи давление равно нулю [Л15]. По оценкам, $P_1 \approx 10^9$ Па [Л16]. Деформации вокруг наностройка Ge(Si) обусловлены рассогласованием постоянных решеток кремния ($a_{Si} = 0,543$ нм) и германия ($a_{Ge} = 0,568$ нм): $(a_{Si} - a_{Ge})/a_{Si} = 4,2 \cdot 10^{-2}$. Таким образом, деформации, вызванные образованием РО ($\sim 0,7 \cdot 10^{-2}$ вблизи РО на стадии ее формирования), из-за малой величины слабо влияют на деформации вокруг наностроек Ge(Si) и, как следствие, определяемые ими оптоэлектронные свойства (спектр энергии носителей заряда и др.).

В п. 4.5.3 по модели Госсика рассчитан потенциал электрического поля РО и радиус R_2 области пространственного заряда (ОПЗ) вокруг нее [Л17]. Если потенциальный барьер вокруг РО $\phi_c = 0,17$ эВ и радиус ядра РО $R_1 = 10$ нм, то $R_2 = 150$ нм. Зависимость доли наностроек (от их полного числа в гетероструктуре), находящихся в ОПЗ РО от F_n представлена на рисунке 9 (R_2 принимался равным 100 нм). Из рисунка 9 видно, что электрические поля множества РО оказывают влияние на 4% наностроек в многослойных гетероструктурах при $F_n = 10^{14}$ см $^{-2}$, доля наностроек возрастает до 40% при $F_n = 10^{15}$ см $^{-2}$.

В п. 4.5.4 проанализированы некоторые механизмы влияния РО на оптоэлектронные свойства наностроек Ge(Si): разрыв экситонов электрическим полем, туннелирование носителей заряда на уровни радиационных дефектов, образующих РО, изменение концентрации носителей заряда вблизи наностроек в ОПЗ РО вследствие изменения положения краев разрешенных зон.

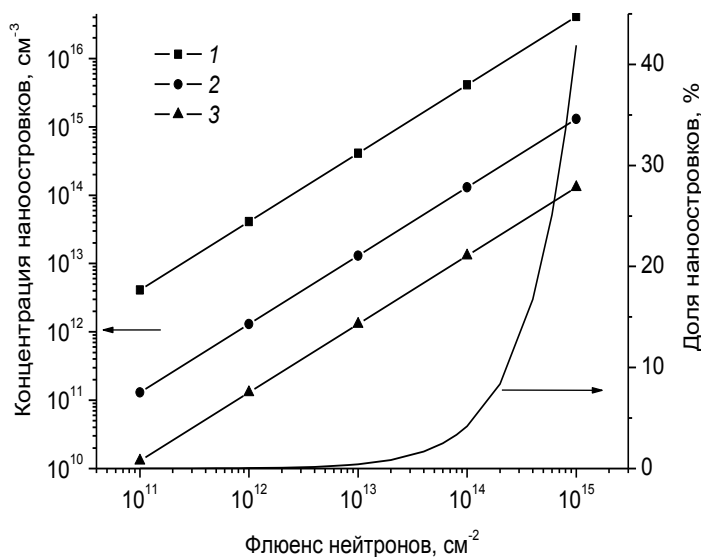


Рисунок 9 — Зависимости концентрации наностроек Ge(Si) в многослойном массиве, находящихся в ОПЗ РО, от флюенса нейтронов. Расчет выполнен для различных поверхностных плотностей и числа слоев в гетероструктуре (таблица 1):
 1 — $3 \cdot 10^{11}$ см $^{-2}$, 36 слоев;
 2 — 10^{10} см $^{-2}$, 20 слоев;
 3 — 10^9 см $^{-2}$, 20 слоев

В п. 4.6 сформулированы выводы к Главе 4.

В **Заключении** обобщены результаты работы, сформулированы перспективы дальнейшей разработки темы диссертации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования методом математического моделирования показали:

1. Переходный слой вблизи границы раздела кремний/сапфир промышленных гетероструктур КНС с отличным от объемного кремния фазовым составом и плотностью способствует перераспределению имплантируемых ионов между кремнием и сапфиром.

2. Переходный слой, возникший в приборном слое в процессе газофазной эпитаксии промышленных гетероструктур КНС, расширяется в сапфир за счет образования радиационных дефектов при перераспределении имплантируемых ионов между кремнием и сапфиром.

3. Ростовые дефекты кристаллической структуры приборного слоя КНС слабо (в рамках предложенной модели) влияют на пробеги ускоренных ионов, однако концентрация радиационных точечных дефектов будет значительно (на десятки процентов) больше, чем в совершенном кремнии, из-за наличия слабо связанных атомов вблизи них.

4. Повышение структурного совершенства промышленных структур КНС после аморфизации имплантацией ионами кремния или кислорода обеспечивается твердофазной рекристаллизацией приборного слоя от сохранившегося вблизи поверхности слоя кремния.

5. Упругие напряжения и ростовые дефекты в КНС обуславливают более эффективное перераспределение легирующих примесей в процессе отжига по сравнению с совершенным недеформированным кремнием: отличия концентрации бора на одном и том же расстоянии от поверхности приборного слоя может достигать 1,4 раза, фосфора – более 1,5 раз.

6. Радиационные дефекты в сапфире, возникающие при легировании гетероструктур КНС с толщиной приборного слоя 0,3 мкм бором с энергией 100 кэВ и более, заряжаются при воздействии стационарного ионизирующего излучения, что приводит к обеднению основными носителями (вплоть до инверсии типа проводимости) кремния вблизи границы раздела кремний/сапфир и способствует формированию канала утечки между стоком и истоком МОП транзисторов.

7. Доля самоформирующихся наноостровков Ge(Si)/Si(001) (высотой 10–12 нм, размером в плоскости основания 65–75 нм), в которых образуются радиационные точечные дефекты, составляет около 3% от их полного числа в многослойной гетероструктуре при плотностях каскадов атомных смещений,

соответствующих флюенсам нейтронов с энергией 1 МэВ равным 10^{14} – 10^{15} см⁻².

8. Средняя концентрация возникающих при облучении кремния быстрыми нейтронами с флюенсом 10^{11} – 10^{15} см⁻² разупорядоченных областей составляет 10^{10} – 10^{14} см⁻³, что на порядок меньше концентрации наноструктур в современных гетероструктурах с наноструктурами Ge(Si)/Si(001). Поэтому возникновение разупорядоченных областей в объеме наноструктур, приводящее к деградации их оптоэлектронных свойств, маловероятно.

9. Упругие деформации кристаллической решетки, вызванные образованием разупорядоченной области ($\sim 0,7 \cdot 10^{-2}$), из-за малой величины не влияют на деформации вокруг наноструктур Ge(Si) ($\sim 4,2 \cdot 10^{-2}$) и, как следствие, определяемые ими физические свойства (спектр энергии носителей заряда и др.).

10. Электрические поля множества разупорядоченных областей оказывают влияние на 4% наноструктур Ge(Si) от их полного числа в многослойной гетероструктуре при флюенсе нейтронов 10^{14} см⁻², и до 40% наноструктур при флюенсе 10^{15} см⁻².

Список цитируемой литературы

Л1. Козлов, Ю.Ф. Структуры кремния на сапфире: технология, свойства, методы контроля, применение / Ю.Ф. Козлов, В.В. Зотов. – Москва: МИЭТ, 2004. – 140 с.

Л2. Christoloveanu, S. Silicon films on sapphire / S. Christoloveanu // Report of Progress Physics. – 1987. – V. 50. – P. 327–370.

Л3. Перевошиков, В.А. Геттерирование примесей и дефектов в полупроводниках / В.А. Перевошиков, В.Д. Скупов. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского университета, 2002. – 220 с.

Л4. Красильник, З. Ф. Сравнительный анализ радиационного воздействия на электролюминесценцию кремния и SiGe/Si(001)-гетероструктур с самоформирующимися наноструктурами / З.Ф. Красильник, К.Е. Кудрявцев, А.Н. Качемцев и др. // Физика и техника полупроводников. – 2011. – Т. 45. – №2. – С. 230–234.

Л5. Экштайн, В. Компьютерное моделирование взаимодействия частиц с поверхностью твердого тела / В. Экштайн. – Москва: Мир, 1995. – 321 с.

Л6. Александров, П.А. Особенности процесса твердофазной рекристаллизации аморфизированных ионами кислорода структур кремний-на-сапфире / П.А. Александров, К.Д. Демаков, С.Г. Шемардов, Ю.Ю. Кузнецов // Физика и техника полупроводников. – 2009. – Т. 43. – №5. – С. 627–629.

Л7. Александров, П.А. Рекристаллизация с границы раздела кремний-сапфир как новый метод получения структурно совершенных пленок кремния на

сапфировой подложке / П.А. Александров, К.Д. Демаков, С.Г. Шемардов, Ю.Ю. Кузнецов // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т. 44. – №10. – С. 1433–1435.

Л8. Атомная диффузия в полупроводниках. Под редакцией Д. Шоу. – Москва: Мир, 1975. – 684 с.

Л9. Rios, R. Modeling of effect of interfacial charge on impurity diffusion in silicon-on-sapphire device processing / R. Rios, A. Rothwarf, C.W. Magee, S.M. Tyson // IEEE Transaction on Electronic Devices. – 1986. – ED-33. – №9. – P. 1270–1277.

Л10. Abrahams, M.S. Cross-sectional electron microscopy of silicone on sapphire / M.S. Abrahams, C.J. Buicchi // Applied Physics Letters. – 1975. – V. 27. – №6. – P. 325–327.

Л11. Давыдов, Г.Г. Методика оперативного неразрушающего контроля дозовой стойкости КМОП БИС на КНС-структурах / Г.Г. Давыдов, А.В. Согоян, А.Ю. Никифоров и др. // Микроэлектроника. – 2008. – Т. 37. – №1. – С. 67–77.

Л12. Яшанин, И.Б. Влияние технологии изготовления на дозовую деградацию тока потребления КМОП/КНД БИС / И.Б. Яшанин, А.В. Скобелев, В.В. Маслов Г.Г. Давыдов // Вопросы атомной науки и техники. С. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2009. – В. 4. – С. 33–35.

Л13. Balestra, F. Deep depletion SOI MOSFETs with back potential control: a numerical simulation / F. Balestra, J. Brini, P. Gentil // Solid-State Electronics. – 1985. – V. 28. – №10. – P. 1031–1037.

Л14. Якимов, А.И. Фотодиоды Ge/Si со встроенными слоями квантовых точек Ge для ближней инфракрасной области (1,3–1,5 мкм) / А.И. Якимов, А.В. Двуреченский, А.И. Никифоров и др. // Физика и техника полупроводников. – 2003. – Т. 37. – №11. – С. 1383–1388.

Л15. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика. В 10-ти т. Т. VII. Теория упругости. 4-е изд. / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – Москва: Наука, 1987. – 248 с.

Л16. Артемьев, В.А. Влияние упругих напряжений на кинетику формирования областей разупорядочения в кремнии / В.А. Артемьев, В.В. Михнович // Физика и техника полупроводников. – 1986. – Т. 20. – №1. – С. 167–170.

Л17. Новиков, В.А. Влияние неоднородного распределения радиационных дефектов в GaAs на спектры DLTS / В.А. Новиков, В.В. Пешев // Физика и техника полупроводников. – 1998. – Т. 32. – №4. – С. 411–416.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

А1.Скупов, А.В. Особенности моделирования методом Монте-Карло профилей пространственного распределения внедряемых ионов и радиационных дефектов в гетерокомпозициях «кремний на сапфире» / А.В. Скупов, С.В. Оболенский, В.Д. Скупов // Физика и химия обработки материалов. – 2006. – №4. – С. 5–11.

А2.Скупов А.В Моделирование процесса ионно-лучевого легирования гетерокомпозиции «кремний на сапфире» методом Монте-Карло с учетом влияния дислокационной структуры / А.В. Скупов, С.В. Оболенский // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2007. – №4. – С. 37–42 (Skupov A.V. Monte Carlo simulation of ion-beam doping of a silicon-on-sapphire heterostructure with regard to the dislocation structure / Skupov A.V., Obolenskii S.V. // Journal of surface investigation: X-ray, synchrotron and neutron techniques. – 2007. – V. 1. – №2. – P. 207–211).

А3.Скупов, А.В. Особенности моделирования диффузионных процессов в гетерокомпозициях «кремний на сапфире» / А.В. Скупов, В.Д. Скупов, С.В. Оболенский // Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2007. – №4. – С. 45–49.

А4.Скупов, А.В. Моделирование процессов образования радиационных дефектов в гетероструктурах с самоформирующимися наноостровками Ge(Si)/Si(001) при облучении нейтронами / А.В. Скупов // Физика и техника полупроводников. – 2015. – Т. 49. – №5. – С. 634–637 (Skupov A.V. Simulation of radiation-defect formation processes in heterostructures with self-assembled Ge(Si)/Si(001) nanoislands under neutron irradiation / Skupov A.V. // Semiconductors. – 2015. – V. 49. – №5. – P. 621–624).

А5.Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010617268. Программа для численного моделирования процессов дефектообразования в многослойных многокомпонентных твердотельных гетерокомпозициях с внутренней структурой при движении в их объеме ускоренных ионов («TRIS») / А.В. Скупов // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2010.

А6.Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017613086. Программа для моделирования процессов дефектообразования в многослойных многокомпонентных полупроводниковых гетероструктурах с нановключениями при корпускулярном облучении «TRISQD» / А.В. Скупов // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2017.