

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д212.166.01, СОЗДАННОГО  
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ НИЖЕГОРОДСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н.И. ЛОБАЧЕВСКОГО»  
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ,  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 27.11.2019 № 17

О присуждении Скупову Антону Владимировичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Моделирование ионно-лучевого легирования гетероструктур «кремний на сапфире» и облучения нейтронами гетероструктур с наноструктурами Ge(Si)» по специальности 01.04.10 – «Физика полупроводников» – принята к защите 18 сентября 2019 г. (протокол заседания № 11) диссертационным советом Д212.166.01, созданным на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 603950, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23, приказ от 11.04.2012 г. №105/нк о создании диссертационного совета.

Соискатель Скупов Антон Владимирович, 1981 года рождения, в 2003 году окончил государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» по специальности «Информационные системы (в физике)», в 2007 г. завершил освоение программы подготовки научно-педагогических кадров в заочной аспирантуре ННГУ им. Н.И. Лобачевского (срок обучения с 10.12.2003 г. по 10.12.2007 г.), работает в должности ведущего инженера-исследователя в научно-

исследовательском отделе спецстойкости, надежности и механической прочности филиала федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова».

Диссертация 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».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Оболенский Сергей Владимирович, директор научно-исследовательского радиофизического института ННГУ им. Н.И. Лобачевского.

Официальные оппоненты:

1. 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»;

2. 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»

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ КИ) – в своем положительном отзыве, составленном и подписанном Александровым Петром Анатольевичем, доктором физико-математических наук, директором Института информационных технологий НИЦ КИ, Фанченко Сергеем Сергеевичем, кандидатом физико-математических наук, начальником лаборатории рентгеновской диагностики поверхности Института информационных технологий НИЦ КИ, Капустиным Юрием Владимировичем, кандидатом физико-математических наук,

ученым секретарем Института информационных технологий НИЦ КИ, Форшем Павлом Анатольевичем, доктором физико-математических наук, главным ученым секретарем НИЦ КИ, и утвержденном Егорычевым Виктором Юрьевичем, заместителем директора по фундаментальным исследованиям НИЦ КИ, указала, что актуальность темы диссертации обусловлена необходимостью численного моделирования ионной имплантации как легирующих, так и аморфизирующих примесей в приборные слои композиции КНС (кремний на сапфире) и расширением области практического применения наноэлектронных полупроводниковых приборов на основе гетероструктур с наноструктурами Ge(Si), что выдвинуло в число актуальных проблему моделирования деградационных процессов в них под действием ионизирующих излучений для анализа радиационных эффектов и интерпретации результатов экспериментальных исследований. Ведущая организация отмечает, что «представленные в работе теоретические результаты являются новыми», отмечает теоретическую и практическую значимость полученных автором результатов, позволивших «многократно повысить процент выхода годных микросхем по параметру «статический ток потребления» отечественных БИС серий 1825 и 1620 в филиале ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю.Е. Седакова», что подтверждено актом внедрения результатов диссертации». В отзыве ведущей организации даны рекомендации по дальнейшему использованию результатов и выводов диссертации. В отзыве ведущей организации указывается, что диссертация «представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, соответствует паспорту специальности 01.04.10 – «Физика полупроводников» и удовлетворяет требованиям, предъявляемым Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук в соответствии с «Положением о присуждении ученых степеней» в редакции, утвержденной постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842. Автор диссертации, Скупов Антон Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – «Физика полупроводников».

Соискатель имеет 36 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 28 работ, из них 4 статьи в рецензируемых научных изданиях,

включенных в Перечень ВАК РФ и индексируемых в международных библиографических базах Web of Science, Scopus и Chemical Abstracts, 18 публикаций в сборниках трудов и тезисов докладов российских и международных научных конференций, 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

В публикациях соискателя по теме диссертации отражена проделанная им работа по исследованию 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 по моделированию процессов дефектообразования в гетероструктурах с nanoостровками Ge(Si)/Si(001) при облучении нейтронами. Личный вклад соискателя в опубликованные по теме диссертации работы является определяющим.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. 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.

2. 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.

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

4. Скупов, А.В. Моделирование процессов образования радиационных дефектов в гетероструктурах с самоформирующимися nanoостровками Ge(Si)/Si(001) при облучении нейтронами / **А.В. Скупов** // Физика и техника полупроводников. – 2015. – Т. 49. – №5. – С. 634–637.

Сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых

изложены основные научные результаты диссертации, **достоверны**.

На автореферат диссертации поступило 4 отзыва:

1) Качемцев Александр Николаевич, ведущий инженер лаборатории ХВБС Института химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых РАН, в своем отзыве на автореферат диссертации отмечает, что «Актуальность темы работы не вызывает сомнений и соответствует основным направлениям Федеральных целевых программ по разработке отечественной электронной компонентной базы», «Полученные данные и результаты их анализа представляют научную и практическую ценность для разработчиков и изготовителей изделий современной радиационно-стойкой микроэлектроники», «Автором продемонстрировано владение как численными, так и аналитическими методами математического моделирования».

Отзыв содержит три замечания:

1) «из текста на страницах 12 (абзац 4) и 1 (абзац 1) не совсем понятно, при каких воздействиях (технологических или эксплуатационных) происходит образование токов утечки, и чем это плохо, с точки зрения потребителя микросхем»;

2) «утверждение на странице 14, что «На рисунке 4 показано... внедрение ионов бора в сапфир, сопровождающееся образованием радиационных дефектов» носит декларативный характер, поскольку на рисунке 4 приведены только данные по профилю распределения имплантированных ионов бора»;

3) «из текста автореферата не ясно, к каким последствиям для оптоэлектронных свойств массивов nanoостровков германий в кремнии приводит облучение таких гетероструктур потоком нейтронов».

2) Козлов Владимир Анатольевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института физики микроструктур РАН – филиала федерального государственного бюджетного научного учреждения "Институт прикладной физики Российской академии наук", лауреат Государственной Премии, в своём отзыве на автореферат отмечает, что «диссертационная работа выполнена на высоком уровне, и имеет научную и практическую значимость».

Отзыв содержит два замечания:

1) «При оценках величины упругих напряжений от nanoостровков Ge/Si в многослойной гетероструктуре не учитывается их суперпозиция от соседних nanoостровков, как в вертикальном, так и в латеральном направлениях»;

2) «Не ясно, насколько справедливо приближение однократного рассеяния нейтронов на ядрах кремния в гетероструктуре с наноструктурами. Если это приближение не выполняется, то одному падающему нейтрону будет соответствовать несколько разупорядоченных областей. В этом случае приведенные на рисунках 8 и 9, а также выводах, численные оценки будут не справедливы».

3) Елесин Вадим Владимирович, доцент кафедры электроники Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» и Метелкин Игорь Олегович, инженер-исследователь ЦЭПЭ Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», в своем отзыве на автореферат диссертации отмечают, что рассмотренное исследование «является актуальным при решении задач создания радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), предназначенной для функционирования в жестких условиях эксплуатации, включая аппаратуру научного эксперимента, бортовые электронные системы космических аппаратов и системы доверенного назначения», «Автореферат дает представление о содержании, методах исследования и результатах диссертации. Текст автореферата написан терминологически правильно и его отличает хороший научный стиль».

Отзыв содержит два замечания:

1) «Требуется обоснование преимуществ используемых методов моделирования, разработанных математических моделей и алгоритмов расчета по сравнению с уже известными, получившими распространение, например, таких как метод молекулярной динамики, а также модели и алгоритмы, реализованные в пакетах программ TRIM-XX и SRIM-20XX».

2) «Отсутствует описание конкретных технологических решений по обеспечению радиационной стойкости КНС структур и БИС, выполненных на их основе».

4) Кревский Михаил Анатольевич, кандидат физико-математических наук, заместитель начальника НПО ТПМ АО «НПП «Салют» в своем отзыве на автореферат отмечает, что использование многослойных гетероструктур с самоформирующимися наноструктурами Ge(Si) для создания оптоэлектронных приборов – перспективное направление развития опто- и наноэлектроники, и что вопрос о радиационной стойкости таких приборов пока слабо изучен; «Разработанные автором модели и программные средства, по-видимому, позволяют

провести аналогичные расчеты для гетерокомпозиций с любым химическим составом, размером наностроек, толщиной разделяющих слоев и др., что является практически полезным результатом». Отзыв не содержит замечаний.

Все отзывы на автореферат диссертации положительные. В отзывах, содержащих замечания, подчеркивается, что последние не влияют на положительную в целом оценку работы и не снижают ценности защищаемой диссертации. Во всех отзывах делается вывод, что А.В. Скупов заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тематической близостью их научных исследований и диссертационной работы соискателя. Ведущая организация – Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» – занимается исследованиями в области разработки технологических основ получения гетероструктур «кремний на сапфире» со структурно совершенным приборным слоем и радиационной стойкости элементной базы, создаваемой на основе как этих гетероструктур, так и квантоворазмерных наногетероструктур. В частности, известны работы следующих специалистов ведущей организации по указанной тематике: Александров П.А. (составитель отзыва ведущей организации), Жук В.И., Литвинов В.Л., Демаков К.Д., Шемардов С.Г., Воскобойников Р.Е. Официальный оппонент Бутин В.И. – ведущий специалист в области исследований радиационной стойкости современной и перспективной элементной базы радиоэлектронной аппаратуры. Официальный оппонент Земляков В.Е. – специалист в области технологии твердотельной электроники.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

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 уровне 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 nanoостровками Ge(Si)/Si(001) при облучении быстрыми нейтронами. **Получена** зависимость количества nanoостровков, 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, существенно меньше, чем

определяющие оптоэлектронные свойства наноструктур деформации, обусловленные рассогласованием параметров кристаллических решеток наноструктур и окружающего их кремния. Установлена зависимость количества наноструктур, попадающих в область действия электрических полей разупорядоченных областей, от флюенса нейтронов.

### **Доказано, что**

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 одинаковых 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. 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<sup>-2</sup>) нейтронами с флюенсом  $10^{15}$  см<sup>-2</sup> 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 наностроек Ge(Si)/Si(001) быстрыми нейтронами, существенно меньше, чем определяющие оптоэлектронные свойства наностроек деформации, обусловленные рассогласованием параметров кристаллических решеток наностроек и окружающего их кремния. Количество наностроек, 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<sup>-2</sup> и увеличивается до 40% при флюенсе  $10^{15}$  см<sup>-2</sup>.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что проведена модернизация** существующих моделей строения гетерокомпозиции «кремний на сапфире» для учета влияния переходного слоя, ростовых дефектов кристаллической структуры и полей упругих напряжений на процессы, происходящие при ионно-лучевом легировании. Результаты исследования влияния ростовых дефектов кристаллической структуры на процессы, происходящие при имплантации ионов, и образования радиационных дефектов в гетероструктурах с наностройками Ge(Si)/Si(001) при облучении нейтронами получены **модификацией существующих алгоритмов** моделирования движения ускоренных ионов в многослойных многокомпонентных структурах и реализованы соискателем в оригинальных компьютерных программах.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что** результаты расчетов профилей распределения легирующих примесей, выполненных соискателем, использованы при разработке технологических процессов создания КМОП/КНС БИС в филиале ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю.Е. Седакова» (подтверждено актом внедрения).

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

Достоверность теоретических результатов подтверждается верификацией разработанных компьютерных программ, проведённой путём сравнения полученных с их помощью авторских результатов с результатами, полученными с помощью других программ для одинаковых тестовых задач, а также сравнением с известными экспериментальными и теоретическими данными. Для реализации предложенных моделей использованы широко распространенные численные методы.

**Результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы для использования** в различных научно-образовательных и научно-исследовательских организациях, среди которых можно выделить Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (г. Нижний Новгород), Институт физики микроструктур РАН – филиал федерального государственного бюджетного научного учреждения «Институт прикладной физики Российской академии наук» (г. Нижний Новгород), Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (г. Москва), Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (г. Зеленоград), Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (г. Москва), а также на отечественных предприятиях-производителях полупроводниковых гетероструктур и элементной базы на их основе (филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю.Е. Седакова» (г. Нижний Новгород), ОАО НПП «Сапфир» (г. Москва), АО «Ангстрем» (г. Москва), ПАО «Элма» (г. Москва). АО «НПП «Салют» (г. Нижний Новгород)). Результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы для подбора режимов технологических операций ионно-лучевого легирования с целью обеспечения оптимальных рабочих характеристик и радиационной стойкости полупроводниковых приборов и интегральных схем на основе гетероструктур, состоящих из приборного слоя на диэлектрической сапфировой подложке, или «кремний на изоляторе», а также для оценки и прогнозирования степени деградации гетероструктур с наноструктурами в зависимости от интенсивности потока воздействующего корпускулярного излучения.

#### **Личный вклад соискателя.**

Соискателем 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 соискателя является определяющим. Все расчеты проведены соискателем, анализ их результатов – совместно с научным руководителем.

**Диссертационный совет отмечает, что диссертация Скупова А.В. соответствует паспорту научной специальности 01.04.10 – «Физика полупроводников» и представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, содержащую новые и оригинальные результаты, относящиеся к решению актуальной научной задачи по исследованию процессов ионно-лучевого легирования гетероструктур «кремний на сапфире» и облучения нейтронами гетероструктур с наноструктурами Ge(Si). Диссертация Скупова А.В. вносит вклад в развитие физики полупроводников, микро- и нанoeлектроники и отвечает соответствующему требованию к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842.**

**С учетом вышесказанного установлено, что диссертация Скупова А.В. соответствует всем критериям и требованиям Раздела II Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013, № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.**

На заседании 27.11.2019 г. диссертационный совет принял решение присудить Скупову А.В. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации (01.04.10 – физика полупроводников), участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 19, против 0 (нет), недействительных бюллетеней 0 (нет).

Председатель

диссертационного совета



Чупрунов Евгений Владимирович

Ученый секретарь

диссертационного совета

Марычев Михаил Олегович

Дата оформления Заключения 27.11.2019 г.