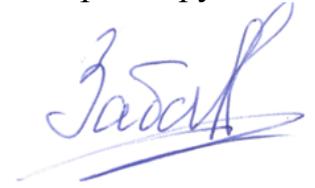


На правах рукописи



Забавичев Илья Юрьевич

**ОТКЛИК НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В SI И GAAS НАНОРАЗМЕРНЫХ
СТРУКТУРАХ НА НЕЙТРОННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ С УЧЕТОМ
ДИНАМИКИ ВТОРИЧНЫХ ПРОЦЕССОВ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ И
ИОНИЗАЦИИ**

2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2025

Работа выполнена на кафедре квантовой радиофизики и электроники радиофизического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского»

Научный руководитель:

Оболенский Сергей Владимирович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой квантовой радиофизики и электроники радиофизического факультета ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород

Официальные оппоненты:

Васильевский Иван Сергеевич,

доктор физико-математических наук, доцент,
заместитель директора; ведущий научный сотрудник
центра радиофотоники и СВЧ-технологий; профессор
кафедры физики конденсированных сред института
нанотехнологий в электронике, спинтронике и
фотонике Национального исследовательского ядерного
университета «МИФИ», г. Москва

Егоркин Владимир Ильич, кандидат технических
наук, ведущий научный сотрудник научно-
исследовательской лаборатории «Элементная база
наноэлектроники» института интегральной
электроники имени академика К. А. Валиева
Национального исследовательского университета
«Московский институт электронной техники, г. Москва

Ведущая организация:

Федеральное государственное унитарное предприятие
«Всероссийский научно-исследовательский институт
автоматики им. Н. Л. Духова», г. Москва

Защита состоится 4 декабря 2025 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.1.238.02 при Федеральном исследовательском центре «Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова» Российской академии наук по адресу: 603087, Нижегородская область, Кстовский район, д. Афоново, ул. Академическая, д. 7, ауд. 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики микроструктур РАН и на сайте http://www.ipmras.ru/UserFiles/Diss/2025/zabavichev-ilya-yurevich/diss_ZabavichevIlya.pdf

Автореферат разослан ____ октября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.238.02,
доктор физико-математических наук,
профессор РАН



Водолазов Денис Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена исследованию отклика носителей заряда в Si и GaAs наноразмерных структурах на нейтронное воздействие с учетом динамики вторичных процессов дефектообразования и ионизации. Это позволило решить важную задачу оценки реакции перспективных наноразмерных приборов на радиационное воздействие с учетом ранее не рассматриваемых эффектов фемто- и пикосекундной динамики формирования кластеров радиационных дефектов.

В качестве объектов исследования были рассмотрены наиболее распространенные Si и GaAs диодные и транзисторные структуры, размеры рабочих областей которых составляют порядка 100 нм. Для приборов данного класса существенными становятся эффекты, связанные с «горячими» носителями заряда, у которых энергия превышает равновесное значение для заданной температуры. При таких размерах активных областей прибора носители заряда движутся практически без столкновений, за исключением рассеяния на радиационных дефектах.

Особенностями физических процессов переноса носителей заряда в момент формирования кластера радиационных дефектов (КРД) являются два одновременно протекающих процесса: 1) образование нанометровых разупорядоченных областей точечных дефектов – субкластеров (СКРД), 2) генерация неравновесных носителей заряда вследствие процесса ионизации. При этом вероятность одновременного формирования двух и более КРД в наноструктуре пренебрежимо мала.

Для анализа указанных выше эффектов впервые была предложена методика моделирования переноса электронов в Si и GaAs диодных и транзисторных структурах с помощью комплекса численных моделей в квазигидродинамическом приближении и на основе метода Монте-Карло с использованием результатов моделирования процесса формирования КРД при воздействии отдельных ядерных частиц (ОЯЧ), полученных с помощью метода молекулярной динамики. Особенностью предлагаемой методики является учет внутренней структуры КРД с помощью различных потенциалов рассеяния.

С помощью предложенной методики были исследованы процессы изменения переноса носителей заряда в полевых транзисторах с современными топологическими нормами 7-20 нм в момент формирования единичного КРД и их влияние на сбоеустойчивость элементарных ячеек статической памяти на их основе. Получено, что процесс дефектообразования способен вызвать нештатное переключение состояния, записанного в ячейку памяти, вследствие временного уменьшения проводимости канала транзистора. Определен диапазон энергий первичных атомов отдачи, способный вызвать сбой, развивающийся по указанному механизму: для 20 нм - ~ 200 кэВ, для 7 нм - ~ 100 кэВ.

Кроме этого, были проведены исследования по влиянию положения единичного КРД на характеристики GaAs биполярных транзисторов с тонкой базой. Показано, что формирование КРД в эмиттерном переходе уменьшает коэффициент усиления по току в 20 раз, по сравнению с необлученной структурой. При формировании КРД в базе увеличивается темп рекомбинации носителей в ней за счет взаимодействия дырок, захваченных на глубокие уровни дефектов, и электронов, диффундирующих в базе. В сильнолегированном коллекторе транзистора при формировании КРД за счет дополнительного рассеяния увеличивается его сопротивление, что приводит к уменьшению величины протекающего тока в активном режиме работы транзистора.

Актуальность темы исследований

Развитие полупроводниковой электроники в первую очередь связано с сокращением размеров активных областей полупроводниковых структур, что позволяет добиться улучшения таких характеристик аналоговых приборов как предельная частота работы, а также уменьшить время переключения логических элементов цифровых микросхем. Однако наряду с этим увеличивается их чувствительность к воздействию отдельных ядерных частиц (протонов, нейтронов и тяжелых заряженных частиц) [1]. В результате их взаимодействия с атомами твердого тела возникают области со структурными повреждениями или дефектами, в которых

кристаллическая решетка становится разупорядоченной. Проводимость разупорядоченной области, которую называют кластером радиационных дефектов (КРД), существенно меньше проводимости неповрежденного полупроводникового материала. Поэтому, когда её размеры становятся сопоставимы с размерами активной области современных полупроводниковых приборов (~ 10..100 нм), происходит значительное ухудшение электрофизических параметров приборов. Образование точечных радиационных дефектов, а именно вакансий и междоузельных атомов, приводит к появлению в запрещенной зоне полупроводника системы глубоких энергетических уровней. В связи с этим, увеличивается скорость рекомбинации носителей заряда [2] и снижается их подвижность и концентрация [3], что приводит к ухудшению характеристик полупроводниковых приборов.

В современных аналоговых приборах наноэлектроники, функционирующих в субтерагерцовом диапазоне частот, характерное время пролета носителей заряда через активную область, а также время переключения состояния ячеек памяти цифровых микросхем сопоставимы с временем формирования кластера радиационных дефектов (~ 100 фс) [4]. В связи с развитием микроэлектроники становится необходим анализ особенностей переноса носителей заряда через формирующийся кластер радиационных дефектов. Одновременно с образованием КРД происходит генерация электронно-дырочных пар, вызванная ионизацией объемного полупроводника высокоэнергичной частицей, приводящая к протеканию импульса тока фемтосекундной длительности. Оценка формы импульса тока по результатам численного моделирования позволит адекватно проводить расчет сбоев полупроводниковых приборов и интегральных схем – оценивать порог интенсивности воздействия потока нейтронов, приводящих к сбою интегральных схем.

Не только временные, но и пространственные масштабы процесса образования даже одного кластера становятся сопоставимы с размерами активных областей современных полупроводниковых приборов [5, 6]. В этом случае особенно актуальным становятся вопросы не только общего количества кластеров, но и места их образования, так как от последнего будет зависеть степень ухудшения характеристик прибора.

Метод физико-топологического моделирования часто используется для анализа физических процессов, протекающих в полупроводниковых приборах. Он заключается в численном расчете электрофизических характеристик прибора на основе информации о его структуре: химическом составе, профиле легирования примеси и геометрических размерах каждого слоя. Применение данного подхода для оценки изменения электрофизических характеристик прибора во время и после радиационного воздействия требует детальной информации о каскадах атомных смещений: их геометрических размерах и концентрации радиационных дефектов. Также необходимо учитывать, что для подвижных носителей заряда, чья энергия выше средней энергии электронно-дырочной плазмы, разупорядоченная область радиационных дефектов выступает не как единый центр рассеяния, а распадается на отдельные области, так называемые субкаскады или субкластеры, которые являются рассеивающими центрами горячих электронов [7].

Цель и задачи диссертации

Исследование пико- и фемтосекундных процессов отклика носителей заряда Si и GaAs наноразмерных структурах на нейтронное воздействие с учетом динамики вторичных процессов дефектообразования и ионизации.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработка методики анализа геометрических параметров наноразмерных разупорядоченных областей радиационных дефектов, образующихся в полупроводниковых материалах в результате воздействия потока мгновенных нейтронов спектра деления, позволяющей детально оценить пико- и фемтосекундные процессы её формирования в Si.

2. Разработка комплекса математических моделей для численного моделирования переноса носителей заряда, учитывающих влияние формы потенциала рассеяния на кластерах радиационных дефектов на характер рассеяния в Si и GaAs наноразмерных структурах.

3. Анализ процессов, протекающих в полупроводниковых структурах с квазибаллистическим характером переноса носителей заряда во время формирования единичного кластера радиационных дефектов и релаксации неравновесных радиационно-генерированных электронно-дырочных пар и его влияния на сбоеустойчивость современных ячеек статической памяти, выполненной на базе Si наноразмерных транзисторов.

4. Анализ изменения характеристик наноразмерного биполярного транзистора на основе GaAs с тонкой базой после формирования единичного кластера радиационных дефектов в зависимости от его пространственного положения.

Научная новизна

1. Впервые показано, что размеры субкластеров радиационных дефектов существенно зависят от стадии формирования разупорядоченной области, на которой происходит разделение каскада атомных смещений на отдельные субкаскады. Поэтому рассеяние подвижных носителей заряда на наноразмерных субкластерах радиационных дефектов возможно на временах больших, чем 100 пс, когда заканчивается первичная стабилизация разупорядоченной области.

2. Впервые проведены расчеты изменения подвижности носителей заряда в Si и GaAs при воздействии потока мгновенных нейтронов спектра деления, учитывающие динамику распределения пространственного заряда внутри наноразмерного кластера радиационных дефектов.

3. Впервые предложен механизм возникновения обратимого сбоя состояния ячейки статической памяти, выполненной на базе Si наноразмерных транзисторов, вызванного появлением дефектов кристаллической решетки в процессе формирования единичного кластера радиационных дефектов, объясняющийся тем, что один из транзисторов переходит из открытого состояния в закрытое на время, достаточное для переключения ячейки статической памяти.

4. Впервые показано, что положение одиночного кластера радиационных дефектов существенно влияет на процессы транспорта носителей заряда в наноразмерном GaAs биполярном транзисторе с тонкой базой. Наибольшее влияние на коэффициент усиления по постоянному току кластер радиационных дефектов оказывает в случае формирования в эмиттерном переходе за счет возникновения дополнительного потенциального барьера. Напротив, в базе кластер эффективно притягивает неосновные носители заряда, что увеличивает темп рекомбинации.

Практическая значимость

1. Разработаны методика и пакет прикладных программ для теоретического анализа результатов моделирования образования дефектов в ПО TRIM и LAMMPS с целью оценки пространственной и временной эволюции процесса формирования наноразмерной разупорядоченной области. Теоретически показано, что размеры кластеров радиационных дефектов, возникающих на поверхности кремниевой пластины, не превышают 5...10 нм, поэтому их невозможно обнаружить экспериментально с помощью метода атомно-силовой микроскопии.

2. Разработан пакет прикладных программ для расчетной оценки реакции Si и GaAs приборов на воздействие потока мгновенных нейтронов спектра деления с учетом пространственной структуры потенциала рассеяния кластера радиационных дефектов. Получены оценки концентрации рассеивающих центров ($10^{12} \dots 10^{14} \text{ см}^{-3}$) в канале наноразмерного полевого транзистора с затвором Шоттки на основе GaAs, возникающих при радиационном воздействии потока нейтронов до $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

3. Разработан комплект прикладного программного обеспечения для оценки влияния процесса формирования единичного кластера радиационных дефектов на характеристики Si наноразмерных полевых транзисторов и диодов с учетом релаксации неравновесных радиационно-генерированных электронно-дырочных пар. Теоретически показано, что для ячеек

статической памяти, выполненных по технологическим процессам 20 нм и 7 нм, сечение сбоев на бит составляет $10^{-20} \dots 10^{-21}$ см²/бит.

4. Разработано программное обеспечение для оценки изменения характеристик наноразмерного биполярного транзистора на основе GaAs с тонкой базой в зависимости от положения единичного кластера радиационных дефектов.

Положения, выносимые на защиту

1. Наноразмерные кластеры радиационных дефектов непосредственно на поверхности Si структур при нейтронном воздействии не образуются, что обусловлено величиной средней энергии первичного атома отдачи в кремнии, при которой доминирующим механизмом потери энергии является ионизация материала, а не возникновение вторичных атомов отдачи.

2. Определены границы применимости различных потенциалов, описывающих рассеяние носителей заряда на наноразмерном кластере радиационных дефектов в Si и GaAs, которые зависят от средней энергии носителей заряда и реализуемого пространственного профиля электрического поля:

– потенциал рассеяния, описываемый потенциальным барьером бесконечной высоты, подходит для описания изменения подвижности носителей заряда в полупроводниковом материале в слабо неоднородных электрических полях;

– потенциал Госсика подходит для описания процессов рассеяния термализованных носителей заряда на кластерах радиационных дефектов в целом в GaAs приборах с размерами рабочей области 250 нм и более;

– потенциал Флеминга наиболее корректно описывает механизм рассеяния горячих носителей заряда с квазибаллистическим характером движения на субкластерах радиационных дефектов в Si приборах наноэлектроники с размерами рабочей области 100 нм и менее, в которой реализуется резко неоднородный профиль электрического поля.

3. Формирование единичного кластера радиационных дефектов приводит к возникновению сбоя логического состояния ячеек статической памяти, состоящих из Si транзисторов с проектными нормами менее 20 нм. Удельное сечение сбоев для данного механизма лежит в диапазоне от 1.1×10^{-15} до 1.5×10^{-14} см/бит.

4. Уменьшение коэффициента усиления по постоянному току GaAs биполярного транзистора с тонкой (115 нм) базой существенно зависит от положения единичного кластера радиационных дефектов и составляет:

– более чем в 10 раз, в случае, когда кластер формируется в переходе эмиттер-база;

– до 3 раз, в случае, когда кластер формируется в квазинейтральной области базы.

Личный вклад автора

Личный вклад автора заключается в:

– разработке программного обеспечения для анализа пространственных параметров кластеров радиационных дефектов в полупроводниковых материалах, проведении численных расчетов и анализа полученных результатов [A2];

– проведении моделирования временной эволюции структуры кластера радиационных дефектов методом молекулярной динамики и обработки результатов численных экспериментов [A3, A6, A7];

– теоретическом исследовании с помощью численного моделирования изменения электрофизических характеристик полупроводниковых приборов после облучения нейтронами различных энергий совместно с коллегами [A1, A4, A5, A8]

– исследовании поверхности (обработке результатов измерений с помощью атомно-силового микроскопа СММ-2000) структур «кремний на изоляторе» после облучения нейтронами различных энергий [A9];

– планировании и обработке результатов исследований совместно со специалистами РФЯЦ ВНИИЭФ в г. Саров и РФЯЦ ВНИИТФ в г. Снежинск.

Исследуемые структуры изготавливались в НПП «Салют» (г. Нижний Новгород) и ИФМ РАН (г. Нижний Новгород).

Степень достоверности и апробация результатов

Представленные в настоящей работе результаты обладают высокой степенью достоверности, что обеспечивается использованием современных теоретических методов моделирования совместно с апробированными программными комплексами для проведения расчетов. Полученные результаты хорошо согласуются с изложенными в литературе данными по теме исследований.

Основные результаты диссертации отражены в 78 публикациях, в том числе, 18 статьях в реферируемых журналах и 58 тезисах научных конференций: XIX, XX, XXI, XXII, XXIII, XXIV, XXV, XXVI и XXVII Международных симпозиумов «Нанозифика и нанозлектроника» 2015-2023, XXI, XXII, XXIII, XXIV, XXV, XXVI и XXVII научных конференций по радиофизике 2017-2023, XVIII и XIX Всероссийской научно-технической конференции по радиационной стойкости электронных систем. «Стойкость-2015» и «Стойкость-2016», II российско-белорусской научно-технической конференции «Элементная база отечественной радиоэлектроники: импортозамещение и применение» им. О.В. Лосева 2015, международной конференции «Суперкомпьютерные дни в России» 2015, XX международной конференции «Харитоновские чтения» 2018, XXVII, XXVIII научно-технической конференции «Молодежь в науке» 2018-2023, VII Всероссийской конференции и школы молодых ученых и специалистов «Физические и физико-химические основы ионной имплантации» 2018, XX Харитоновских тематических научных чтений 2018.

Внедрение научных результатов

Работа выполнена при поддержке базовой части Государственного задания, проект № FSWR-2024-0003.

Результаты, полученные в работе, используются при выполнении НИОКР 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» при выполнении научно-исследовательских работ в рамках научной программы Национального центра физики и математики (Проект «Ядерная и радиационная физика»).

Результаты диссертации использованы в учебном процессе (Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского) при подготовке учебно-методического пособия «Физико-топологические модели переноса носителей заряда в полупроводниковых приборах» для студентов ННГУ, обучающихся по направлениям подготовки 03.03.03 и 03.04.03 «Радиофизика», 02.03.02 и 02.04.02 «Фундаментальная информатика и информационные технологии», специальностям 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», 11.05.02 «Специальные радиотехнические системы».

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 185 страниц, включая 69 рисунков, 21 таблицу и список цитируемой литературы из 114 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, и сведения об апробации основных результатов диссертации.

В **первой** главе проведен краткий анализ текущего состояния проблемы, связанной с оценкой реакции субмикронных полупроводниковых приборов на радиационное воздействие. В

главе обосновывается выбор структур для исследований, которые наиболее чувствительны к процессам, протекающим при формировании КРД. Короткие структуры диодов, в которых проявляется эффект всплеска скорости, позволяют достигать терагерцовых частот функционирования. Также интерес представляют короткоканальные транзисторные структуры, в которых возможен квазибаллистический характер движения электронов, что позволяет дополнительно повысить быстродействие. Однако формирование единичного КРД приводит к сбою работы данных классов полупроводниковых приборов.

В п. 1.1. рассматриваются источники радиационного излучения: их параметры и характеристики.

В п. 1.2. приведены основные эффекты в полупроводниковых материалах, вызванные воздействием радиационного излучения. Подробно рассматривается процесс дефектообразования при нейтронном воздействии, а также известные методы его моделирования и методики оценки геометрических параметров кластеров радиационных дефектов. Данные методики позволяют оценить набор параметров кластера (средние размеры субкластера и среднее расстояние между ними) с ограниченной точностью и не анализируют их временную динамику, что недостаточно для моделирования переноса носителей заряда при формировании одиночного КРД.

В п. 1.3. описано изменение основных характеристик классических диодных и транзисторных структур при воздействии потока мгновенных нейтронов спектра деления. Также по известным экспериментальным данным проведен анализ механизмов сбоев ячеек статической памяти на основе современных транзисторов при воздействии нейтронов. К моменту написания работы был не исследован механизм возникновения сбоя ячейки памяти, вызванного образованием радиационных дефектов.

Особенности моделирования реакции приборов микро- и нанoeлектроники при радиационном воздействии обсуждаются в п. 1.4. К моменту написания работы был не исследован вопрос влияния на результаты моделирования формы потенциала рассеяния на кластерах радиационных дефектов.

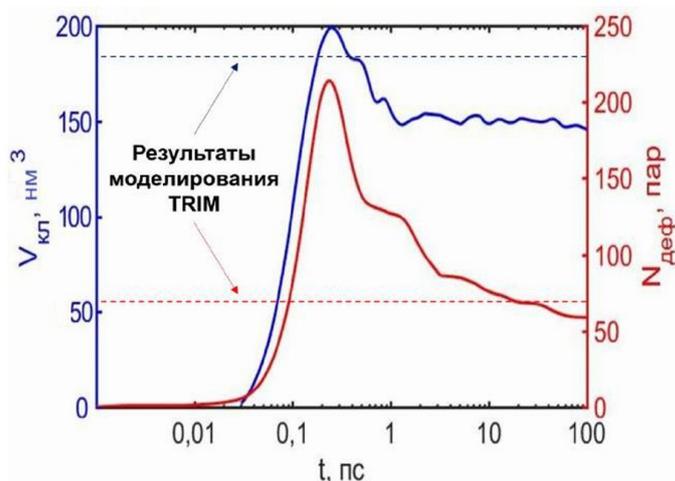


Рисунок 1 – Временная динамика процесса формирования кластера радиационных дефектов в кремнии, инициированного первичным атомом отдачи кремния с энергией 3 кэВ. Характерные стадии: баллистический участок (до 0,04 пс), участок термического расширения (от 0,04 до 0,2 пс), стадия первичной стабилизации (от 0,2 до 0,5 пс) и стадия быстрого отжига (от 0,5 пс). Отличие полученных результатов от оценок, выполненных с помощью ПО TRIM [8], обусловлено тем, что математическая модель TRIM не учитывает процессы стабилизации дефектов

Во второй главе подробно рассмотрено моделирование процесса формирования кластеров радиационных дефектов в полупроводниковых структурах при воздействии потока мгновенных нейтронов спектра деления и предложена методика анализа пространственного распределения КРД в полупроводниковых структурах, позволяющая получить детальную и точную информацию о параметрах кластера и их эволюцию во времени.

В п. 2.1 рассматривается временная эволюция процесса образования разупорядоченной области радиационных дефектов в кремнии: выделены основные стадии формирования и их продолжительность (рисунок 1).

С помощью расчетов обоснованы исходные данные для моделирования методом молекулярной динамики (потенциал

взаимодействия, размер области моделирования). Продемонстрированы недостатки существующего метода оценки пространственной топологии радиационных дефектов.

В п. 2.2 предложен оригинальный алгоритм анализа пространственного распределения радиационных дефектов в кластерах, образующихся при нейтронном воздействии, включающий в себя: 1) Анализ распределения первичных атомов отдачи по энергии, результаты которого используются в качестве исходных данных для численного моделирования каскадов атомных смещений с помощью метода Монте-Карло [8] или метода молекулярной динамики [9]; 2) Анализ количества субкластеров в отдельном КРД с помощью двукратного применения алгоритма кластеризации DBSCAN [10]. При первом использовании алгоритма DBSCAN происходит оценка общего числа дивакансий и субкластеров дивакансий в каскаде атомных смещений. Затем в полученном разбиении происходит поиск отдельных субкластеров, чьи области пространственного заряда не перекрываются друг с другом; 3) Анализ характеристик отдельных СКРД сводится к аппроксимации каждого субкластера эллипсоидом вращения с помощью алгоритма [11]. Затем оцениваются характеристики получившихся эллипсоидов – размеры вдоль каждой оси и общий объем и число дефектов в каждом отдельном СКРД. Оригинальность данного подхода заключается в соединении известных алгоритмов в общую методику, позволяющую получить детальную информацию о пространственных параметрах кластера. В отличие от подхода, основанного на исследовании пространственного распределения дефектов в составе кластера, который позволяет определить лишь усредненные параметры, предлагаемый метод оценивает детальную структуру: количество и размеры каждого субкластера, входящего в состав кластера и их пространственное распределение.

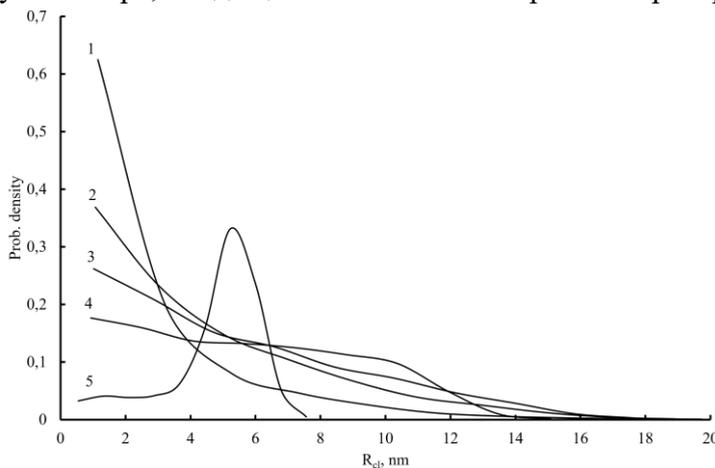


Рисунок 2 – Распределение размеров субкластеров R_{cl} для различных энергий первичного атома отдачи: 1 – 800 кэВ, 2 – 90 кэВ, 3 – 60 кэВ, 4 – 30 кэВ, 5 – 10 кэВ. Для 10 кэВ распределение имеет вид близкий к Гауссову, так как при данной энергии кластер не разделяется на субкластеры

Также с помощью метода, предложенного в п. 2.2, анализировалось изменение числа субкластеров и общего числа дефектов в течение 100 пс формирования кластера радиационных дефектов, образованного первичным атомом отдачи с энергией 50 кэВ. Данная энергия была выбрана для расчетов исходя из того, что является пороговым значением, при котором кластер равновероятно распадается или не распадается на отдельные субкаскады (рисунок 3).

Разделение кластера радиационных дефектов на отдельные СКРД происходит двумя возможными способами. В первом (рисунок 3 (а)) выделение СКРД из каскада атомных смещений происходит на стадии стабилизации кластера, когда происходит первичный отжиг радиационных дефектов. В этом случае один из субкластеров, как правило, имеет большие размеры по сравнению с другим. Напротив, если разделение на субкластеры происходит на стадии термического расширения (рисунок 3 (б)), оба образовавшихся субкаскада имеют размеры одного порядка. При формировании кластера радиационных дефектов первичными

В п. 2.3 с помощью предложенного алгоритма был проведен анализ пространственного распределения кластеров радиационных дефектов для различных условий формирования в Si, GaAs, Ge и GaN при облучении быстрыми нейтронами с энергиями, соответствующими среднему и максимальному значению спектра деления. Были рассчитаны основные параметры субкластеров: средние размеры, их количество в одном каскаде и среднее расстояние между ними. Отдельно были рассчитаны распределения размеров субкластеров, количества субкластеров и расстояния между ними для различных энергий первичного атома в кремнии (рисунок 2).

атомами с большей энергией эти два механизма в конечном счете определяют число и размеры субкластеров внутри разупорядоченной области. Первый механизм будет доминировать при низких энергиях атома отдачи, однако с ростом энергии первичного атома отдачи начнет преобладать второй механизм разделения на субкластеры, за счет более длинного трека частицы. Ранее такая детализация кластерообразования для анализа радиационной стойкости диодов и транзисторов не применялась.

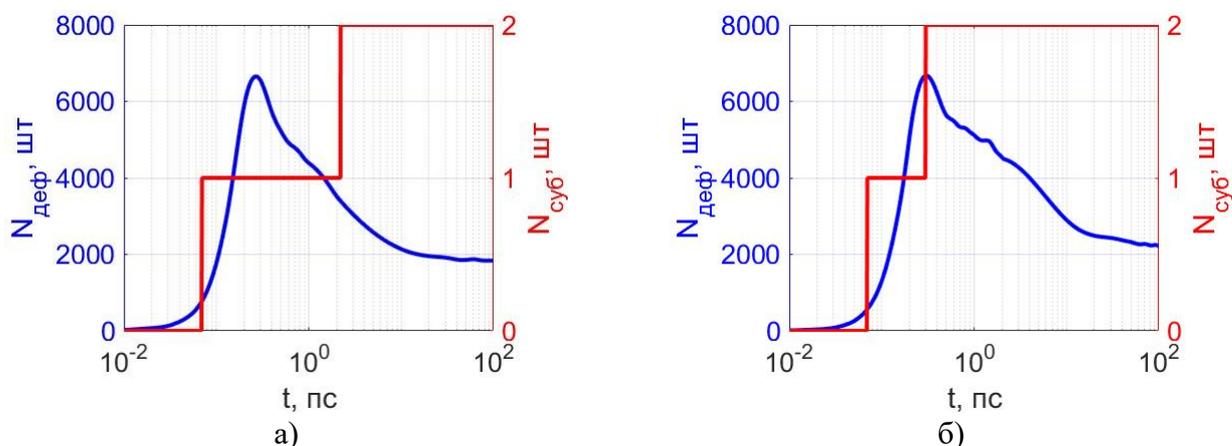


Рисунок 3 – Характерные зависимости числа субкластеров и общего числа радиационных дефектов в течении 100 пс формирования каскада атомных смещений, образованного первичным атомом отдачи Si с кинетической энергией 50 кэВ: а) разделение на субкластеры на стадии стабилизации каскада атомных смещений; б) разделение на субкластеры на стадии термического расширения кластера радиационных дефектов. Первый механизм доминирует при низких энергиях атома отдачи, второй – при высоких

В п. 2.4. представлены результаты анализа топологии радиационных дефектов, образующихся на поверхности подложек типа «кремний на изоляторе». Для оценки параметров СКРД, образующихся на поверхности кремния, было проведено численное моделирование с помощью метода молекулярной динамики. В ходе моделирования рассматривались два предельных случая взаимодействия нейтрона с атомом вещества. В первом случае нейтрон взаимодействует с атомом поверхности мишени, образуя первичный атом отдачи, который движется вглубь образца. Другим вариантом является случай, когда нейтрон взаимодействует с атомом в глубине мишени, и в результате упругого рассеяния первичный атом отдачи движется к поверхности образца. Характерные результаты моделирования поверхности мишени в виде изображений электронного сканирующего микроскопа представлены на рисунке 4 а) и 4 б).

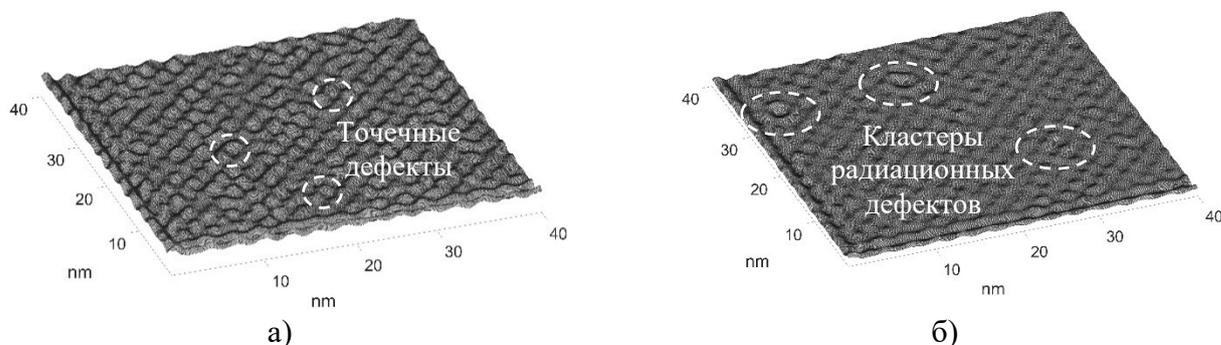


Рисунок 4 – Характерные изображения поверхности мишени для различных условий формирования КРД: а) первичный атом отдачи движется с поверхности вглубь мишени; б) первичный атом отдачи движется из мишени в сторону поверхности. В первом случае на поверхности образуются в основном точечные дефекты, во втором – кластеры радиационных дефектов

Из полученных результатов следует, что на поверхности полупроводникового материала после воздействия потока нейтронов возможны два типа структурных повреждений: точечные дефекты типа пар Френкеля, образующиеся в результате обратного рассеяния атомов, и субкластеры точечных дефектов, образующиеся около точки вылета высокоэнергичного атома отдачи. Однако вероятность обратного рассеяния первичного атома отдачи невелика, поэтому и формирование КРД вблизи поверхности маловероятно, что подтверждается результатами экспериментальных исследований с помощью атомно-силового микроскопа изменения рельефа структур типа «кремний на изоляторе» после воздействия потока нейтронов [А9]. В GaAs реализуется ситуация, что для рассматриваемой средней энергии первичного атома отдачи ядерные потери намного больше электронных, поэтому вероятность формирования КРД вблизи поверхности значительно увеличивается, что и объясняет результаты эксперимента [12].

В **третьей** главе описаны результаты моделирования транспорта носителей заряда в Si и GaAs нанометровых диодных и транзисторных структурах при рассеянии на кластерах радиационных дефектов.

В **п. 3.1.** изложена методика моделирования процессов переноса носителей заряда в Si и GaAs после нейтронного воздействия. В **п. 3.1.1** рассмотрены различные потенциалы рассеяния на кластерах радиационных дефектов для моделей Флеминга [13] и Госсика [14]. Каскады атомных смещений выступают в качестве центров рассеяния подвижных носителей заряда, поэтому для описания механизмов рассеяния необходимо ввести понятия частоты и углов рассеяния. В **п. 3.1.2** для различных потенциалов рассеяния были рассчитаны зависимости частоты рассеяния на разупорядоченных областях радиационных дефектов от энергии носителей заряда. В **п. 3.1.3** представлена методика расчета углов рассеяния на кластерах радиационных дефектов.

В **п. 3.2** изложены результаты моделирования изменения параметров GaAs и Si при воздействии потока мгновенных нейтронов спектра деления. В данном разделе представлены расчеты изменения подвижности носителей заряда после радиационного воздействия: сравнение экспериментальных данных и результатов расчета для различных потенциалов рассеяния на кластерах радиационных дефектов представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Изменение подвижности носителей заряда после радиационного воздействия: сравнение экспериментальных данных и результатов расчета для различных потенциалов рассеяния на кластерах радиационных дефектов в GaAs

Поток нейтронов, част./см ²	Литературные данные [15], μ_0 , см ² В ⁻¹ с ⁻¹	Потенциал «жесткой сердцевины»		Потенциал Флеминга [13]		Потенциал Госсика [14]	
		μ , см ² В ⁻¹ с ⁻¹	$\Delta\mu/\mu_0$, %	μ , см ² В ⁻¹ с ⁻¹	$\Delta\mu/\mu_0$, %	μ , см ² В ⁻¹ с ⁻¹	$\Delta\mu/\mu_0$, %
0	4948	4950	0,04	4950	0,04	4950	0,04
10 ¹³	4943	4937	0,12	4933	0,2	4938	0,13
5×10 ¹³	4924	4921	0,06	4919	0,1	4918	0,12
10 ¹⁴	4898	4934	0,73	4880	0,36	4830	1,38
5×10 ¹⁴	4723	4665	1,22	4660	1,33	4710	0,27
10 ¹⁵	4487	4479	0,17	4530	0,95	4509	0,5
5×10 ¹⁵	3349	3275	2,2	3360	0,32	3340	0,26

Из сравнения с экспериментальными данными [15,16], погрешность измерения которых не превышает десяти процентов, следует, что, несмотря на представленные ранее различия, все потенциалы рассеяния корректно описывают изменение подвижности носителей заряда в результате радиационного воздействия. Это связано с тем, что подвижность является интегральной величиной, которая зависит от функции распределения носителей заряда по энергии. Для термализованных электронов она описывается распределением Максвелла, поэтому

весомый вклад в значение подвижности вносят носители заряда, чья энергия меньше $\frac{3}{2}k_B T$. Поэтому различия в потенциалах рассеяния носителей заряда могут проявляться для электронов, чья энергия выше энергии термализированных электронов, что соответствует явлениям, связанным с эффектами всплеска скорости во времени и пространстве.

Таблица 2 – Изменение подвижности носителей заряда после радиационного воздействия: сравнение экспериментальных данных и результатов расчета для различных потенциалов рассеяния на кластерах радиационных дефектов в Si

Поток нейтронов, част./см ²	Литературные данные [16], μ_0 , см ² В ⁻¹ с ⁻¹	Потенциал «жесткой сердцевины»		Потенциал Флеминга [13]		Потенциал Госсика [14]	
		μ , см ² В ⁻¹ с ⁻¹	$\Delta\mu/\mu_0$, %	μ , см ² В ⁻¹ с ⁻¹	$\Delta\mu/\mu_0$, %	μ , см ² В ⁻¹ с ⁻¹	$\Delta\mu/\mu_0$, %
0	1200	1196	0,3	1207	0,6	1204	0,3
10 ¹³	1180	1160	1,7	1187	0,6	1183	0,25
5×10 ¹³	1110	1090	1,7	1095	1,3	1106	0,4
10 ¹⁴	1000	997	0,3	1003	0,3	1010	1
5×10 ¹⁴	400	410	2,4	391	2,2	395	1,3
10 ¹⁵	200	206	3	203	1,5	207	3,5
5×10 ¹⁵	50	47	6	54	8	51	2

В п. 3.3 и п. 3.4 рассмотрены вопросы влияния потенциала рассеяния на эффекты всплеска скорости во времени и пространстве в GaAs структурах.

Результаты моделирования эффектов всплеска скорости во времени (рисунок 5) для модельного распределения напряженности электрического поля во времени (врезка на рисунке 5) и пространстве (рисунок 6) для модельного распределения напряженности электрического поля в пространстве (врезка на рисунке 6) показывают существенное различие между потенциалами [13] и [14] и потенциалом жесткой сердцевины, несмотря на то, что значения параметров всех потенциалов откалиброваны по экспериментальным данным [15].

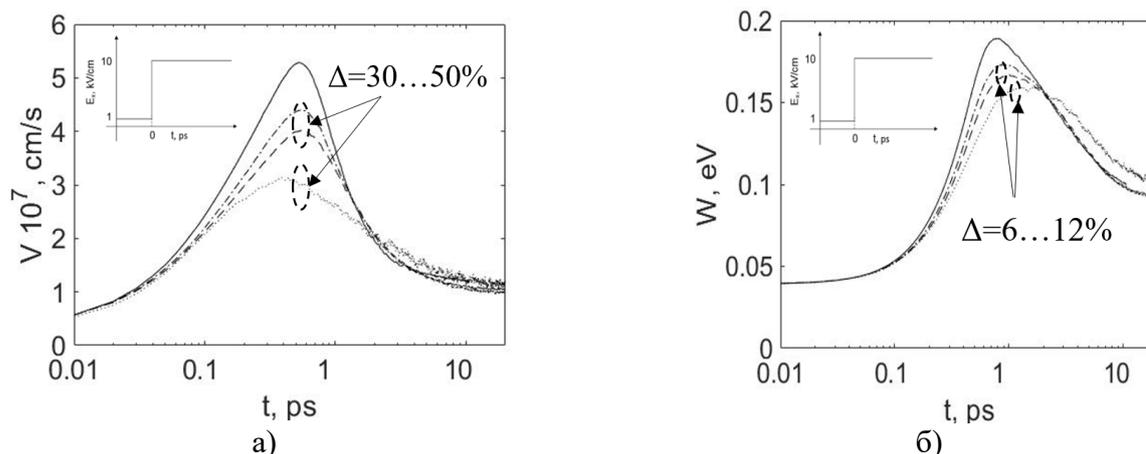


Рисунок 5 – Временные зависимости дрейфовой скорости (а) и средней энергии (б) носителей заряда до и после радиационного воздействия: (—) – до радиационного воздействия, (····) – потенциал «жесткой сердцевины», (---) – потенциал Флеминга, (- · - · -) – потенциал Госсика. Условия численного расчета: GaAs образец с концентрацией доноров $N_d = 10^{17}$ см⁻³, поток нейтронов $F_n = 5 \cdot 10^{15}$ см⁻². На врезке: зависимость напряженности электрического поля от времени

Потенциал жесткой сердцевины используется для упрощения вычислений, однако не учитывает пространственное распределение заряда внутри кластера радиационных дефектов, поэтому для расчетов предпочтительнее использовать потенциалы Госсика и Флеминга.

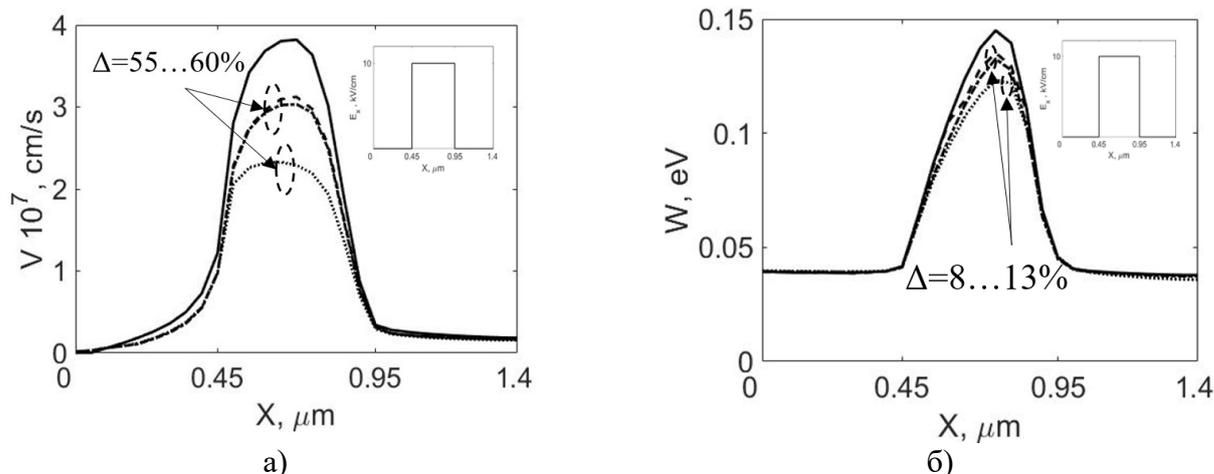


Рисунок 6 – Рассчитанные зависимости дрейфовой скорости (а) и средней энергии (б) электронов в пространстве в *n*-GaAs образце с уровнем легирования $N_d = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ до и после воздействия потока мгновенных нейтронов спектра деления: (—) – до радиационного воздействия, (····) – потенциал «жесткой сердцевины», (---) – потенциал Флеминга, (- · - · -) – потенциал Госсика. Тип радиационного воздействия: поток нейтронов $F_n = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. На врезке: зависимость напряженности электрического поля в пространстве

В п. 3.5 проведен анализ экспериментальных данных с целью оценки концентрации рассеивающих центров, образующих в канале квазибаллистического GaAs полевого транзистора с V-образным затвором Шоттки (ПТШ) при облучении потоком мгновенных нейтронов спектра деления. Результаты оценки для каждого исследуемого потенциала рассеяния для полевых транзисторов с Al и Au затвором представлены на рисунке 7.

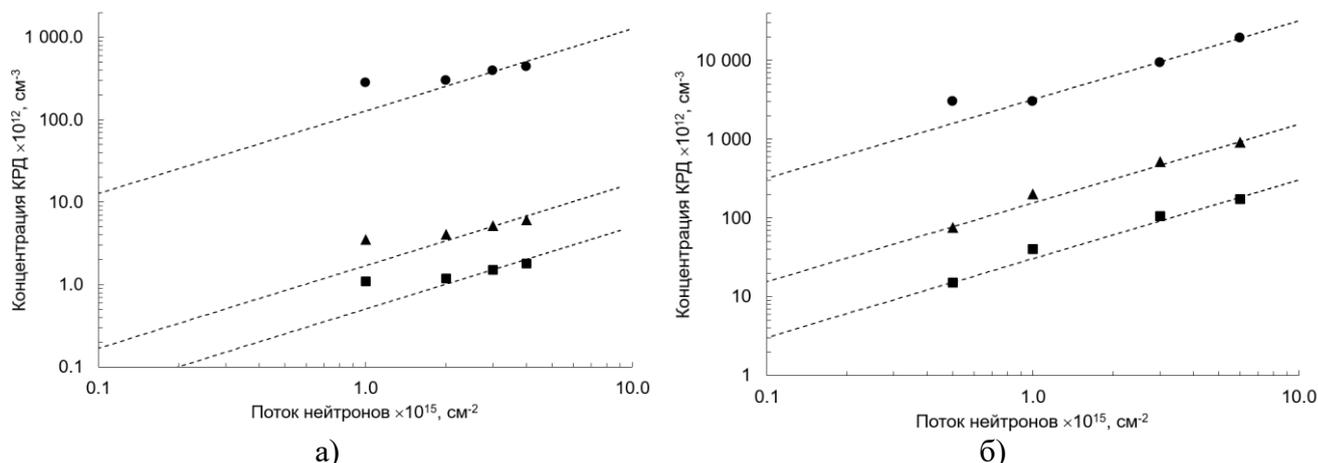


Рисунок 7 – Зависимости концентрации СКРД от потока нейтронов, образующихся в канале квазибаллистического GaAs ПТШ с Al (а) и Au (б) V-образными затворами: потенциал жесткой сердцевины (—●—), потенциал Флеминга (—▲—), потенциал Госсика (—■—). Коэффициент пропорциональности f составляет $0.13, 0.0017$ и 0.0005 см^{-1} для (а) и $3.5, 0.16$ и 0.03 см^{-1} для (б) соответственно

Расчеты, выполненные с помощью потенциала «жесткой сердцевины», соответствуют верхней оценке концентрации СКРД, не учитывающей процессы отжига радиационных дефектов. Также необходимо отметить, что согласно оценкам, полученным с помощью потенциалов Госсика и Флеминга, концентрация заряженных дефектов внутри СКРД составляет $10^{19} \dots 10^{20} \text{ см}^{-3}$, что хорошо согласуется с другими теоретическими оценками [17]. Учитывая

размеры СКРД и общую концентрацию дивакансий, заряженные дефекты будут составлять не более 10 % от общего числа дефектов. Таким образом, использование потенциалов Госсика и Флеминга для теоретических расчетов оценок влияния воздействия нейтронов на Si и GaAs полупроводниковые приборы является физически более обоснованным, чем использование потенциала «жесткой сердцевины». При этом потенциал Госсика подходит для описания процессов рассеяния термализованных носителей заряда на кластерах радиационных дефектов в целом в GaAs приборах с размерами рабочей области 250 нм и более. Потенциал Флеминга наиболее корректно описывает механизм рассеяния горячих носителей заряда с квазибаллистическим характером движения на субкластерах радиационных дефектов в Si приборах нанoeлектроники с размерами рабочей области 100 нм и менее, в которой реализуется резко неоднородный профиль электрического поля, что связано со структурой каскада атомных смещений.

В четвертой главе описаны результаты моделирования переноса носителей заряда в Si и GaAs транзисторных структурах в момент формирования единичного кластера радиационных дефектов. В п. 4.1 представлена методика моделирования переноса носителей заряда в Si с помощью метода Монте-Карло в момент формирования единичного кластера радиационных дефектов. В п. 4.1.1 с помощью численного моделирования методом молекулярной динамики проведена оценка значений временных и пространственных масштабов процесса формирования единичного кластера радиационных дефектов, представленная в таблице 3.

Таблица 3 – Пространственные и временные масштабы процесса формирования кластера радиационных дефектов

Объект \ Масштаб	Пара Френкеля	Электронно-дырочная пара	Кластер радиационных дефектов	Область ионизации
Пространство, нм	2	3	11	24
Время, пс	10^{-4}	10^{-3}	100	0,2

Из полученных результатов следует, что пространственные и временные масштабы процессов упругого взаимодействия и ионизации, которые сопровождают образование разупорядоченной области, существенно различаются. Поэтому для оценки влияния формирования единичного кластера на параметры работы транзисторных структур данные процессы можно рассматривать независимо – на баллистической стадии формирования кластера происходят только процессы, связанные с ионизацией, на более поздних временах происходит только образование дефектов.

В п. 4.1.2 представлена методика расчета тока ионизации, вызванного образованием радиационных дефектов, для оценки реакции субмикронных полупроводниковых приборов на основе диффузионно-дрейфовой модели переноса носителей заряда через пространственно-временное изменение скорости генерации неравновесных носителей заряда. Для приборов с квазибаллистическим характером переноса носителей заряда была предложена методика на основе метода Монте-Карло с предварительным расчетом числа и энергии радиационно-индуцированных электронов.

В п. 4.1.3 представлены методики оценки изменения проводимости, вызванного образованием радиационных дефектов. Аналитическая оценка может быть выполнена с помощью уравнения Вейнера, так как проводимость области скопления радиационных дефектов близка к собственной проводимости полупроводникового материала. Для более точной оценки использовался оригинальный подход, основанный на методе Монте-Карло, в котором для описания рассеяния на формирующейся разупорядоченной области используется изменяющаяся во времени частота рассеяния.

В п. 4.2 представлены результаты моделирования характеристик Si субмикронного диода Шоттки в момент формирования единичного кластера радиационных дефектов. Результаты моделирования переходных ионизационных процессов приведены на рисунке 8 для начальной энергии первичного атома отдачи 3, 12 и 50 кэВ.

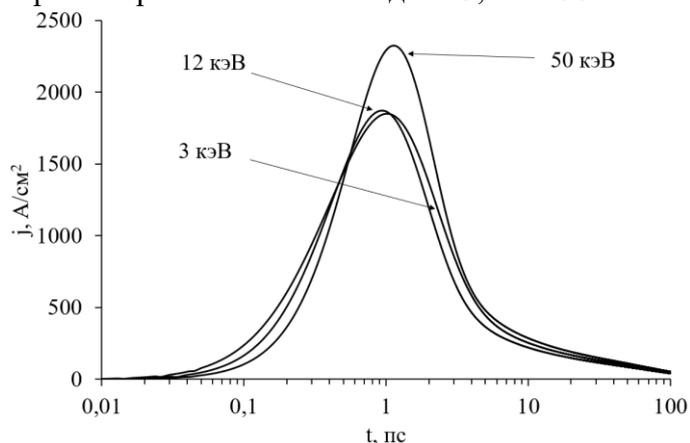


Рисунок 8 – Временная зависимость импульсов ионизационных токов, образованных первичными атомами отдачи различных энергий: 3, 12 и 50 кэВ, рассчитанных с помощью диффузионно-дрейфовой модели

фронта импульса тока одинаковое, так как оно определяется скоростью передачи энергии в электронную подсистему первичным атомом отдачи в процессе ионизации. Это может оказать существенное влияние на работу наноразмерных приборов, с временами переключения ~ 1 пс.

В п. 4.3 представлены результаты моделирования изменения характеристик Si полевых транзисторов в момент формирования единичного кластера радиационных дефектов. Параметры современных транзисторных структур, такие как размеры, напряжение, емкость затвора и критический заряд, величина которого определяет минимальный собранный выводом стока заряд, необходимый для переключения ячейки статической памяти, для которых проведены оценки изменения проводимости канала, представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры современных Si полевых транзисторов

Техпроцесс	1	2	3	4	5
Длина канала, нм	24	18	14	10	10
Ширина канала, нм	92	90	56,5	56,5	56,5
Глубина канала, нм	21	18	12	10	6
Напряжение, В	0,8	0,75	0,7	0,65	0,55
Емкость затвора фФ/мкм	1,81	1,49	1,229	0,97	1,04
Критический заряд, фКл	1,33	1	0,49	0,36	0,33

Влияние процесса формирования единичного КРД на перенос носителей заряда в канале транзисторной структуры рассмотрено на примере образования разупорядоченной области атомом отдачи в кремнии с первоначальной энергией 50 кэВ, так как при данной энергии в кремнии кластер имеет максимально возможный объем среди единичных кластеров, не распадающихся на отдельные субкластеры. В соответствии с уравнением Вейнера, численной моделью на основе самосогласованного метода Монте-Карло, а также данными, представленными в таблице 4, были рассчитаны временные зависимости относительного изменения проводимости канала транзистора при нулевом смещении на затворе для различных технологических норм №1–5, представленные на рисунке 9 (1–5 – аналитическая модель, 1'–5' – численная модель).

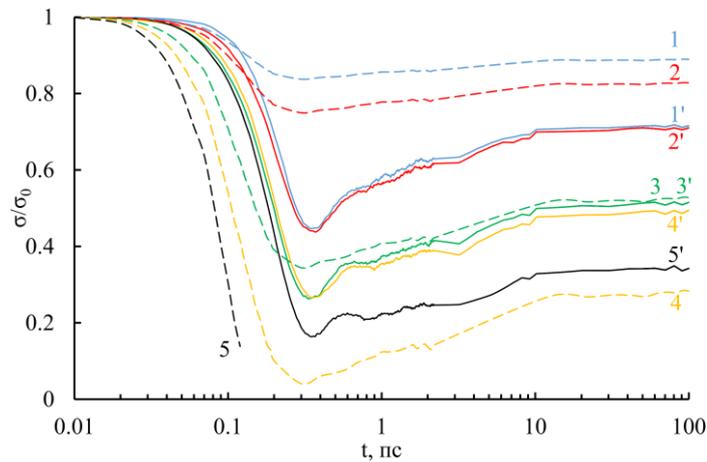


Рисунок 9 – Относительное изменение проводимости канала транзистора при нулевом смещении на затворе для различных технологических норм №1–5: 1– 5 – аналитическая модель, 1’–5’ – численная модель

Из представленных результатов следует, что согласно аналитической оценке при переходе к технологическому процессу №3 возможна ситуация, когда при формировании КРД проводимость канала уменьшается более чем в два раза. Однако численный расчет демонстрирует, что изменение проводимости лишь качественно соответствует аналитической оценке.

Для технологических норм, представленных в таблице 4, было проведено моделирование изменения тока стока транзистора в момент формирования в канале КРД, образованного первичным атомом отдачи с энергией в диапазоне от 3 до 200 кэВ и рассчитаны пороговые значения энергий атомов отдачи, вызывающих сбой. Сбой при формировании КРД для ячеек памяти наступает при энергиях первичного атома отдачи в диапазоне от 100 до 200 кэВ для технологического процесса «20 нм» и от 30 до 40 кэВ для технологического процесса «7 нм».

Полученные диапазоны энергий были использованы для расчета числа сбоев на бит ячейки памяти, вызванных процессом формирования КРД, для различных значений интегрального потока нейтронов, результаты которого представлены на рисунке 10.

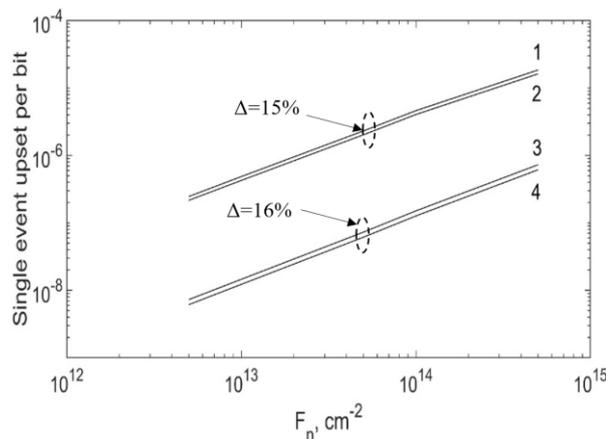


Рисунок 10 – Зависимости числа сбоев на бит, вызванных процессом формирования КРД, от интегрального потока нейтронов для 6Т и 8Т ячейки статической памяти, выполненных по технологическому процессу «20 нм» и «7 нм»: 1 – 8Т-20 нм, 2 – 6Т-20 нм, 3 – 8Т-7 нм, 4 – 6Т- 7 нм

Из данных зависимостей также были рассчитаны удельные сечения сбоев на бит, вызванных процессом формирования КРД, представленные в таблице 5. Для сравнения в таблице 5 указано экспериментальное значение полного удельного сечения сбоев на бит, полученное для технологических норм «350 нм» [18].

Таблица 5 – Удельные сечения сбоев на бит, вызванных процессом формирования КРД

Ячейка статической памяти	Удельное сечение сбоев на бит, см/бит
6Т-7 нм	1.1×10^{-15}
8Т-7 нм	1.3×10^{-15}
6Т-20 нм	1.3×10^{-14}
8Т-20 нм	1.5×10^{-14}
6Т-350 нм [18]	4×10^{-13}

Полученные оценки позволяют сделать вывод о том, по мере уменьшения технологических норм транзисторов процесс формирования КРД будет все больше влиять на общее число сбоев.

В п. 4.4 представлены результаты численной оценки изменения характеристик биполярных транзисторов на основе GaAs с тонкой базой при возникновении в них единичных кластеров радиационных дефектов под действием нейтронного облучения. На рисунке 11 приведены пространственные профили концентрации электронов в рабочей области биполярного $n-p-n$ -транзистора на GaAs с толщиной базы 115 нм для случаев возникновения кластера радиационных дефектов в области пространственного заряда эмиттерного перехода и в квазинейтральной области базы.

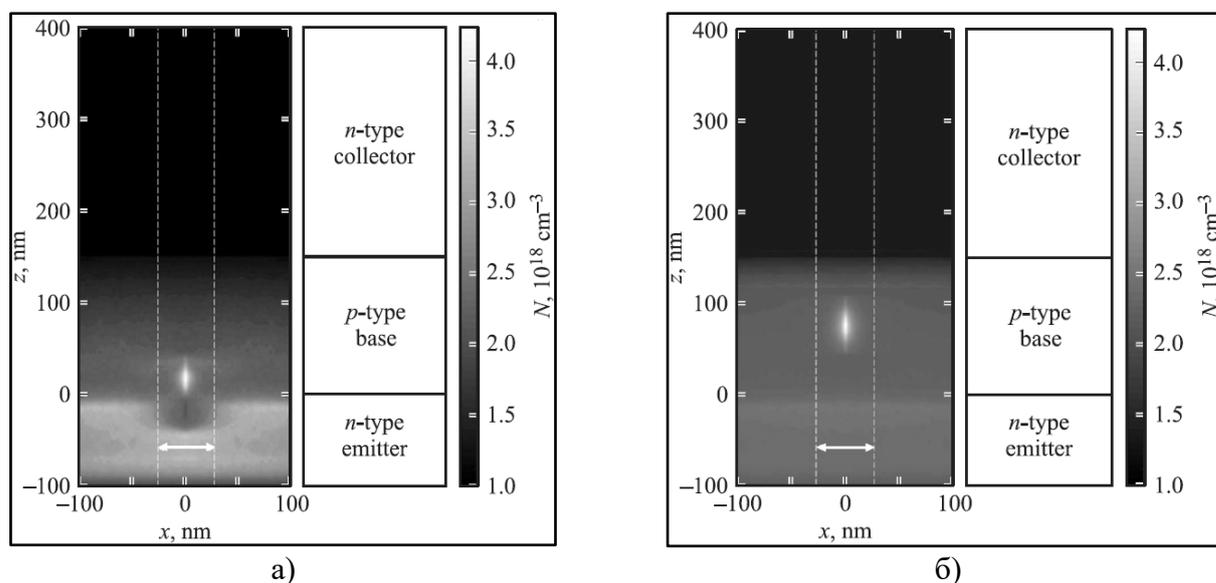


Рисунок 11 – Пространственное распределение концентрации электронов N в рабочей области биполярного транзистора $n-p-n$ -GaAs (активный режим) с учетом кластера радиационных дефектов, сформированного: в области пространственного заряда эмиттерного перехода (а), в квазинейтральной области базы (б). Штриховыми линиями показаны границы области влияния кластера радиационных дефектов на протекание носителей заряда. В сильнолегированном коллекторе транзистора при формировании КРД за счет дополнительного рассеяния увеличится его сопротивление, что приведет к уменьшению величины тока, протекающего в активном режиме его работы

Результаты расчетов изменения коэффициента усиления биполярного GaAs-транзистора по постоянному току в зависимости от положения кластера радиационных дефектов в рабочей области приведены на рисунке 12.

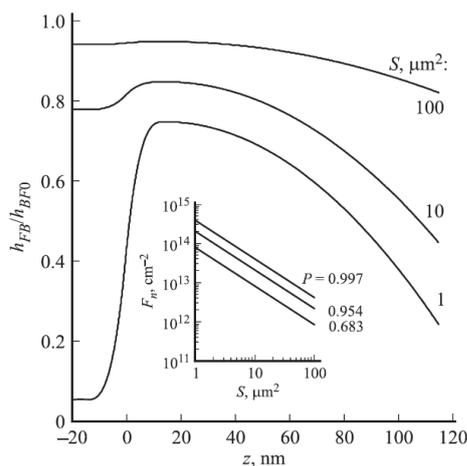


Рисунок 12 – Относительное изменение коэффициента усиления биполярного транзистора на основе GaAs по постоянному току в зависимости от положения одиночного кластера радиационных дефектов в рабочей области.

На вставке — зависимость флюенса нейтронов F_n , достаточная для образования одного и более кластеров радиационных дефектов в рабочем объеме транзистора, от его площади при трех различных вероятностях данного события: $P = 0.997, 0.954, 0.683$

Как следует из полученных результатов, наибольшая степень изменения характеристик имеет место в двух случаях: при образовании кластера радиационных дефектов в области эмиттера (малые значения z) или в квазинейтральной области базы, вдали от эмиттерного перехода (большие значения z). В первом случае уменьшение тока, протекающего через транзистор, объясняется уменьшением прямого смещения перехода эмиттер–база при заданных потенциалах на контактах транзистора из-за увеличения сопротивления объемного слоя эмиттера в результате возникновения кластера радиационных дефектов. Во втором случае снижение коэффициента усиления транзистора вызвано увеличением темпа рекомбинации носителей в базе.

В **Заключении** приведены основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложена методика исследования распределения в пространстве радиационных дефектов, образующихся в полупроводниковых материалах при воздействии нейтронов различных энергетических спектров. Методика предполагает оригинальный подход, основанный на двойном последовательном применении алгоритма кластеризации *DBSCAN* к множеству точечных дефектов для определения неперекрывающихся с учетом области пространственного заряда субкластеров радиационных дефектов с последующей аппроксимацией каждого субкластера эллипсоидом вращения и оценкой его пространственных параметров.

2. Получены оценки характерных размеров субкластеров в GaAs транзисторных структурах с Al и Au затворами с размерами рабочих областей 250 и 100 нм, образующихся при нейтронном воздействии, которые составляют 5...20 нм, что позволило уточнить существующие оценки концентрации сосредоточенных заряженных радиационных дефектов.

3. Продемонстрировано, что наноразмерные кластеры радиационных дефектов после нейтронного воздействия на поверхности Si структур не образуются, что связано со значением средней энергии первичного атома отдачи в кремнии, при которой потери энергии на ионизацию материала существенно превышают потери, связанные с возникновением вторичных атомов отдачи.

4. Обоснованность выбора для расчетов конкретного потенциала, описывающего рассеяние носителей заряда на наноразмерном кластере радиационных дефектов в Si и GaAs определяется средней энергией носителей заряда и пространственным профилем электрического поля, реализуемого в полупроводниковой структуре. Использование потенциала рассеяния,

описываемого потенциальным барьером бесконечной высоты, позволяет оценивать изменение подвижности носителей заряда в Si и GaAs в слабо неоднородных электрических полях. Применение потенциала Госсика позволяет корректно описывать процессы рассеяния термализованных носителей заряда на кластерах радиационных дефектов в целом в GaAs приборах с размерами рабочей области 250 нм и более, так как учитывает наличие внутренней нейтрально заряженной области кластера. Потенциал Флеминга наиболее корректно описывает механизм рассеяния горячих носителей заряда с почти бесстолкновением характером движения на субкластерах радиационных дефектов в Si наноразмерных приборах с характерными масштабами рабочей области 100 нм и менее, в которой формируется резко неоднородный профиль электрического поля.

5. Предложена методика расчета изменения переноса носителей заряда в канале транзистора в момент формирования кластера радиационных дефектов, с помощью которой показано, что формирование единичного кластера радиационных дефектов приводит к возникновению сбоя логического состояния ячеек статической памяти, состоящих из Si транзисторов с проектными нормами 20 нм и менее.

6. Пороговые энергии атомов отдачи в кремнии, взаимодействие которых с атомами вещества формирует в активной области наноразмерного транзистора, единичный кластер радиационных дефектов, способный вызвать кратковременное переключение транзистора из открытого состояния в закрытое, составляют от 90 до 200 кэВ. Удельное сечение сбоев для данного механизма лежит в диапазоне от 1.1×10^{-15} до 1.5×10^{-14} см/бит для шестиэлементной транзисторной ячейки, выполненной по технологии 20 и 7 нм.

7. От положения единичного кластера радиационных дефектов существенным образом зависит уменьшение коэффициента усиления по постоянному току GaAs биполярного транзистора с тонкой (115 нм) базой. В случае, когда кластер формируется в переходе эмиттер-база, коэффициент усиления уменьшается более чем в 10 раз, за счет уменьшения тока, протекающего через транзистор. В случае, когда кластер формируется в квазинейтральной области базы, снижение коэффициент усиления по току до 3 раз вызвано увеличением темпа рекомбинации носителей в базе. При формировании кластера радиационных дефектов в сильнолегированном коллекторе транзистора происходит увеличение его сопротивление за счет дополнительного рассеяния, что приводит к уменьшению величины протекающего тока в активном режиме работы транзистора.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

А1. **Забавичев, И. Ю.** Дegrаdация характеристик биполярных транзисторов на основе GaAs с тонкой базой при возникновении в них нанометровых кластеров радиационных дефектов под действием нейтронного облучения/ И. Ю. Забавичев, А. А. Потехин, А. С. Пузанов, С. В. Оболенский, В. А. Козлов // Физика и техника полупроводников. – 2017. – Т. 51, № 11. – С. 1520–1524. (**Zabavichev, I. Y.** Degradation characteristics of GaAs bipolar transistors with a thin base at formation of nanometer radiation defect clusters under neutron irradiation/ I. Y. Zabavichev, A. A. Potehin, A. S. Puzanov, S. V. Obolenskiy, V. A. Kozlov // Semiconductors. – 2017. – V. 51, N. 11. – P.1466–1471).

А2. **Забавичев, И. Ю.** Транспорт горячих носителей заряда в Si, GaAs, InGaAs и GaN субмикронных полупроводниковых структурах с нанометровыми кластерами радиационных дефектов / И. Ю. Забавичев, Е. С. Оболенская, А. А. Потехин, А. С. Пузанов, С. В. Оболенский, В. А. Козлов // Физика и техника полупроводников. – 2017. – Т. 51, № 11. – С. 1489–1492 (**Zabavichev, I. Y.** Transport of hot charge carriers in Si, GaAs, InGaAs, and GaN submicron semiconductor structures with nanoscale clusters of radiation defects/ I. Y. Zabavichev, E. S. Obolenskaya, A. A. Potehin, A. S. Puzanov, S. V. Obolenskiy, V. A. Kozlov // Semiconductors. – 2017. – V. 51, N. 11. – P. 1435–1438).

А3. **Забавичев, И. Ю.** Моделирование образования каскада смещений и переходных ионизационных процессов в кремниевых полупроводниковых структурах при нейтронном воздействии/ И. Ю. Забавичев, А. А. Потехин, А. С. Пузанов, С. В. Оболенский, В. А. Козлов// Физика и техника полупроводников. – 2019. – Т. 53, № 9. – С. 1279–1284 (**Zabavichev, I. Y.** Simulation of the formation of a cascade of displacements and transient ionization processes in silicon semiconductor structures under neutron exposure/ I. Y. Zabavichev, A. A. Potehin, A. S. Puzanov, S. V. Obolenskiy, V. A. Kozlov// Semiconductors. – 2019. – V. 53, N. 9. – P. 1249–1254).

А4. **Забавичев, И. Ю.** Влияние потенциала рассеяния на радиационных дефектах на перенос носителей заряда в GaAs -структурах/ И. Ю. Забавичев, А. С. Пузанов, С. В. Оболенский, В. А. Козлов // Физика и техника полупроводников. – 2020. – Т. 54, № 9. – С.945-951. (**Zabavichev, I. Y.** Impact of the potential of scattering at radiation-induced defects on carrier transport in GaAs structures/ I. Y. Zabavichev, A. S. Puzanov, S. V. Obolenskiy, V. A. Kozlov // Semiconductors. – 2020. – V. 54, N. 9. – P. 1134–1140).

А5. Пузанов, А. С. Моделирование реакции сверхвысокочастотного низкобарьерного неохлаждаемого диода Мотта на воздействие тяжелых заряженных частиц космического пространства и фемтосекундных лазерных импульсов/ А. С. Пузанов, В. В. Бибилова, **И. Ю. Забавичев**, Е. С. Оболенская, А. А. Потехин, Е. А. Тарасова, Н. В. Востоков, В. А. Козлов, С. В. Оболенский// Физика и техника полупроводников. – 2021. – Т.55, №9. – С.743–747 (Puzanov, A.S. Modeling the response of a microwave low-barrier uncooled Mott diode to the action of heavy ions of outer space and femtosecond laser pulses/ A.S. Puzanov, V.V. Bibikova, **I. Yu. Zabavichev**, E. S. Obolenskaya, A. A. Potekhin, E. A. Tarasova, N. V. Vostokov, V. A. Kozlov, S. V. Obolenskiy // Semiconductors. – 2021. – V. 55, N. 9. – P. 780–784).

А6. **Забавичев, И. Ю.** Влияние процесса формирования единичного кластера радиационных дефектов на проводимость канала транзисторной структуры/ **И. Ю. Забавичев**, А. С. Пузанов, С. В. Оболенский // Физика и техника полупроводников. – 2022. – Т. 56, № 7. – С. 637–641. (**Zabavichev, I. Y.** Influence of single radiation defect cluster forming on transistor structure channel conductivity/ **I. Y. Zabavichev**, A. S. Puzanov, S. V. Obolenskiy // Semiconductors. – 2022. – V. 56, N. 7. – P. 464–468).

А7. **Забавичев, И. Ю.** Влияние процесса образования единичного кластера радиационных дефектов на переключение состояния транзисторной ячейки памяти/ **И. Ю. Забавичев**, А. С. Пузанов, С. В. Оболенский // Физика и техника полупроводников. – 2023. – Т. 57, № 4. – С. 270–275 (**Zabavichev, I. Y.** Influence of single radiation defect cluster formation on transistor memory

cell switching/**I. Y. Zabavichev**, A. S. Puzanov, S. V. Obolenskiy // Semiconductors. – 2023. – V. 57, N. 4. – P. 266–270)

A8. Пузанов, А. С. Моделирование реакции низкобарьерного диода Мотта на воздействие тяжелых заряженных частиц космического пространства/ А. С. Пузанов, В. В. Бибикина, **И. Ю. Забавичев**, Е. С. Оболенская, Е. А. Тарасова, Н. В. Востоков, С. В. Оболенский // Письма в журнал технической физики. – 2021. – Т.47, №6. – С.51-54 (Puzanov, A.S. Simulation of the response of a low-barrier Mott diode to the influence of heavy charged particles from outer space/ A. S. Puzanov, V. V. Bibikova, **I. Yu. Zabavichev**, E. S. Obolenskaya, E. A. Tarasova, S. V. Obolenskii, N. V. Vostokov // Technical Physics Letters. – 2021. – V. 47, N. 6. – P. 305–308).

A9. Логинов, Б. А. Особенности трансформации микрорельефа структур «кремний на изоляторе» при воздействии фотонных и корпускулярных излучений/ Б. А. Логинов, Д. Ю. Блинников., В. С. Второва, В. В. Кириллова, Е. А. Ляшко, В. С. Макеев, А. Р. Первых, Н. Д. Абросимова, **И. Ю. Забавичев**, А. С. Пузанов, Е. В. Волкова, Е. А. Тарасова, С. В. Оболенский // Журнал технической физики. – 2023. – Т. 93, № 7. – С. 1025–1031 (Loginov, B. A. Silicon-on-insulator structures microtopography transformations features after photonic and corpuscular radiation exposure/B. A. Loginov, D. Yu. Blinnikov, V. S. Vtorova, V. V. Kirillova, E. A. Liashko, V. S. Makeev, A. R. Pervykh, N. D. Abrosimova, **I. Yu. Zabavichev**, A. S. Puzanov, E. V. Volkova, E. A. Tarasova, S. V. Obolenskiy // Technical Physics. – 2023. – V. 68, N. 7. – P. 955–960).

A10. **Забавичев, И. Ю.** Влияние параметров измерительного сигнала на погрешность измерений емкости р-п-перехода и определения его радиационной стойкости/ **И. Ю. Забавичев**, С. В. Оболенский // Микроэлектроника. – 2017. – Т. 46, № 6. – С. 472-480 (**Zabavichev, I. Y.** Effect of the measuring signal parameters on the error in capacitance measurements of a p-n transition and determining its resistance to radiation/ **I. Y. Zabavichev**, S. V. Obolenskiy // Russian Microelectronics. – 2017. – V. 46, N. 6. – P. 433–441).

A11. Потехин, А. А. Структура вычислительных средств для исследования радиационной стойкости полупроводниковых приборов и информационная безопасность процедуры моделирования/ А. А. Потехин, **И. Ю. Забавичев**, А. А. Рябов, А. В. Линева, А. Ю. Чуринов, С. В. Оболенский, Л. Ю. Ротков // Вопросы атомной науки и техники, Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2015. – №. 2. – С. 24–30.

A12. **Забавичев, И. Ю.** Моделирование радиационной стойкости квантового компьютера и системы квантовой криптографии/ И. Ю. Забавичев, А. А. Потехин // Вестник ННГУ. Физика твердого тела. – 2014. – №.1(2). – С.64–73.

A13. Потехин, А. А. Применение физико-топологического моделирования для анализа радиационной стойкости серийных полупроводниковых приборов/ А. А. Потехин, **И. Ю. Забавичев**, Е. С. Оболенская, А. А. Васин, Е. А. Тарасова, А. А. Хананова, А. В. Линева, А. Б. Иванов, А. С. Пузанов, С. В. Оболенский // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2018 – №4. – С. 10–17.

A14. Насеткин, К. А. Моделирование характеристик субмикронных структур «кремний на изоляторе» с учетом радиационных эффектов/ К. А. Насеткин, М. С. Муравьев, Г. М. Алимурзов, А. С. Пузанов, **И. Ю. Забавичев**, А. А. Потехин // Научно-технический вестник Поволжья. – 2019. – №7. – С. 127–130.

A15. **Забавичев, И. Ю.** Динамика разогрева и релаксации энергии электронно-дырочной плазмы в треке первичного атома отдачи в GaAs при воздействии нейтронов спектра деления/ **И. Ю. Забавичев**, К. А. Насеткин, Е. С. Оболенская, А. С. Пузанов, Е. А. Тарасова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2020. – №12. – С. 209–211.

A16. **Забавичев, И. Ю.** Моделирование эффектов всплеска скорости в полупроводниковых структурах после радиационного воздействия/ **И. Ю. Забавичев**, К. А. Насеткин, Е. С. Оболенская, А. С. Пузанов, Е. А. Тарасова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2020. – №12. – С. 206–208.

A17. **Забавичев, И. Ю.** Влияние RLC-параметров межтранзисторных соединений на переходной ионизационный процесс в ячейках быстродействующей статической памяти при

воздействии тяжелых заряженных частиц космического пространства/ **И. Ю. Забавичев**, К. А. Насеткин, Е. С. Оболенская, А. А. Потехин, А. С. Пузанов, Е. А. Тарасова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2020. – №12. – С. 203–205.

A18. **Забавичев, И. Ю.** Реинжиниринг профиля легирования диодных и транзисторных структур для расчетной оценки их реакции на воздействие ионизирующих излучений / **И. Ю. Забавичев**, Д. А. Кудряшова, К. А. Насеткин, Е. С. Оболенская, А. А. Потехин, А. С. Пузанов, Е. А. Тарасова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2020. – №12. – С. 200–202.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чумаков, А.И. Действие космической радиации на ИС / А.И. Чумаков – М.: Радио и связь, 2004. – 319 с.
2. Srour, J. R. Short-Term Annealing in 14-MeV Neutron-Irradiated Silicon / J. R. Srour, O. L. Curtis, Jr. // J. Appl. Phys. – 1969. – Vol. 40, No. 10. – P. 4082–4086.
3. Stein, H. J. Transitory electrical properties of n-type germanium after a neutron pulse / H. J. Stein // J. Appl. Phys. – 1960. – Vol. 31, No.8. – P. 1309–1313.
4. Jay, A. Simulation of Single Particle Displacement Damage in Silicon–Part II: Generation and Long-Time Relaxation of Damage Structure / A. Jay, M. Raine, N. Richard, N. Mousseau, V. Goiffon, A. Hemeryck, P. Magnan // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2017. – Vol. 64, No.1. – P. 141–148.
5. Пузанов, А.С. Перенос носителей заряда через тонкую базу гетеробиполярного транзистора при радиационном воздействии / А.С. Пузанов, С. В. Оболенский, В. А. Козлов // Физика и техника полупроводников. – 2015. – Т.49, №1. – С. 71–75.
6. Пузанов, А.С. Влияние случайных неоднородностей в пространственном распределении кластеров радиационных дефектов на перенос носителей заряда через тонкую базу гетеробиполярного транзистора при нейтронном воздействии/ А.С. Пузанов, С. В. Оболенский, В. А. Козлов // Физика и техника полупроводников. – 2016. – Т.50, № 12. – С. 1706–1712.
7. Киселева, Е.В. Микроскопия кластеров радиационных дефектов посредством горячих электронов / Е. В. Киселева, С. В. Оболенский // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2004. – №. 1–2. – С. 46.
8. Ziegler, J.F. The stopping and range of ions in solids / J.F. Ziegler, J.P. Biersak, U. Littmark – Pergamon, N.Y., 1996. – 192 p.
9. Samolyuk, Y.N. Molecular dynamics modeling of atomic displacement cascades in 3C-SiC: comparison of interatomic potentials/ Y.N. Samolyuk, Y.N. Osetskiy, R.E. Stoller // Journal of Nuclear Materials. – 2015. – Vol. 465. – P.83–88.
10. Ester, M. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise / M. Ester, H. Kriegel, J. Sander, X. Xu // Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96). – 1996. – P.226–231.
11. Khachiyan, L.G. Rounding of Polytopes in the Real Number Model of Computation / L.G. Khachiyan // Mathematics of Operations Research. – 1996. – Vol.21, No.2. – P.307–320.
12. Оболенский С. В. Комплексное исследование кластеров радиационных дефектов в GaAs-структурах после нейтронного воздействия / С.В. Оболенский, Е.В. Волкова, А.Б. Логинов, Б.А. Логинов, Е.А. Тарасова, А.С. Пузанов, С. А. Королев // Письма в журнал технической физики. – 2021. – Т. 47, № 5. – С.38–41.
13. Fleming R.M., Seager C. H., Lang D. V., Cooper P. J., Bielejec E. and Campbell J. M. // Journal of Applied Physics. 2007. V. 102. 043711.
14. Gossik, B.R. Disordered region in semiconductors bombarded by fast neutron / B. R. Gossik // J. Appl. Phys. – 1959. – Vol. 30, No. 8. – P.1214–1218.
15. Зулиг, Р. Радиационные эффекты в ИС на GaAs // Арсенид галлия в микроэлектронике/ Р. Зулиг; под ред. Н. Айнспрука, У. Уиссмена – М.: Мир, 1988. – С.501–547.

16. Агаханян, Т.М. Радиационные эффекты в интегральных микросхемах/ Т.М. Агаханян, Е.Р. Аствацатурьян, П. К. Скоробогатов – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 256 с.

17. Оболенский, С.В. Предел применимости локально-полевого и квазигидродинамического приближений при расчетно-экспериментальной оценке радиационной стойкости субмикронных полупроводниковых приборов / С. В. Оболенский // Известия вузов. Электроника. – 2002. – №6. – С.31–38.

18. Пузанов, А.С. Расчетно-экспериментальное моделирование обратимых сбоев ячеек статической памяти субмикронных микросхем при воздействии потоков нейтронов / А.С. Пузанов, С.В. Оболенский, М. М. Венедиктов, В. А. Козлов // Физика и техника полупроводников. – 2019. – Т. 53, № 9. – С. 1250 – 1256.

Забавичев Илья Юрьевич

**ОТКЛИК НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В SI И GAAS НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУРАХ
НА НЕЙТРОННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ
ВТОРИЧНЫХ ПРОЦЕССОВ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ И ИОНИЗАЦИИ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 01.10.2025 г. Формат
Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1. Заказ № 319/25. Тираж 100 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии ННГУ им. Н. И. Лобачевского.

603000, г. Нижний Новгород, ул. Б. Покровская, 37