

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Забавичева Ильи Юрьевича «Отклик носителей заряда в Si и GaAs наноразмерных структурах на нейтронное воздействие с учетом динамики вторичных процессов дефектообразования и ионизации», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств

Актуальность темы

Актуальность настоящего исследования обусловлена скейлингом критического размера ниже 20 нм и переходу к 3D топологии полупроводниковых приборов, что, с одной стороны, позволяет достичь рекордных рабочих частот и быстродействия, а с другой – делает приборы уязвимыми к радиационному воздействию ионизирующих излучений, в том числе, одиночных частиц. Формирующиеся при этом кластеры радиационных дефектов (КРД) размером 10-100 нм сравнимы с масштабами активных зон современных приборов, что приводит к значительной деградации их характеристик, причем этот процесс носит стохастический характер. Особую значимость проблеме придает тот факт, что в субтерагерцевых приборах времена пролета носителей и переключения становятся сопоставимы с временем формирования КРД (~100 фс), что требует новых подходов к моделированию радиационных эффектов.

Важной особенностью является также учет пространственного распределения радиационных дефектов, так как различное расположение области сформированного КРД относительно активной области транзистора приводит к различному вкладу в деградацию рабочих характеристик приборов. Существующие методы физико-топологического моделирования оказываются недостаточными, так как не учитывают динамику формирования субкластеров, выступающих центрами рассеяния для горячих носителей.

Таким образом, актуальность диссертации Забавичева И. Ю. обусловлена необходимостью развития методов описания динамики носителей заряда в наноразмерных структурах кремния и арсенида галлия при облучении нейтронами, с учетом динамики вторичных процессов – как дефектообразования, так и ионизации.

Краткая характеристика основного содержания диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы.

Введение содержит обоснование актуальности диссертационного исследования, формулировку его цели и задач, описание научной новизны и практической значимости полученных результатов. Также в данном разделе

представлены основные положения, выносимые на защиту, и информация об апробации работы.

Первая глава содержит анализ современного состояния проблемы по оценке радиационной стойкости наноразмерных диодных и транзисторных структур. Обоснован выбор приборов, наиболее чувствительных к процессам формирования КРД. К таковым относятся полупроводниковые диоды Шоттки и Мотта, работе которых присущ режим всплеска дрейфовой скорости носителей, за счет чего в них достигаются терагерцевые частоты. Граничные частоты работы нанотранзисторов обусловлены квазибаллистическим характером движения носителей в канале. Однако формирование КРД в активной области транзистора может приводить к сбоям состояния ячейки транзисторной памяти, содержащей этот элемент.

Вторая глава посвящена моделированию формирования КРД при мгновенном воздействии нейтронов и разработке методики анализа пространственного распределения КРД. Предложен оригинальный алгоритм пространственной дифференциации, который, в отличие от существующих методов, позволяет детально оценивать структуру кластера: выявлять количество, размеры и расположение отдельных субкластеров внутри него, аппроксимируя их эллипсоидами. С помощью этого метода проведен анализ для Si, GaAs, Ge и GaN, выявлены два механизма разделения кластеров на субкаскады и исследована эволюция их параметров во времени. Также проанализировано образование дефектов на поверхности структур «кремний на изоляторе». Показано, что в GaAs вероятность формирования КРД у поверхности значительно выше, чем в кремнии, что объясняется различиями в механизмах потерь энергии.

Третья глава посвящена моделированию процессов переноса носителей заряда в нанометровых диодных и транзисторных структурах Si и GaAs при рассеянии на КРД после нейтронного воздействия, включая анализ различных потенциалов рассеяния (Флеминга, Госсика и «жесткой сердцевины»), расчеты частот и углов рассеяния, а также анализ изменений в подвижности носителей. Результаты моделирования показывают, что все рассмотренные потенциалы адекватно описывают интегральные характеристики, такие как подвижность, но различаются в описании эффектов всплеска скорости для горячих носителей, особенно в структурах с неоднородным электрическим полем. Анализ экспериментальных данных для GaAs-транзисторов позволяет оценить концентрацию рассеивающих центров, при этом автор считает, что потенциалы Госсика и Флеминга физически более обоснованы: первый подходит для описания рассеяния термализованных носителей в структурах размером 250 нм и более, а второй – для квазибаллистического транспорта в наноразмерных Si-приборах (100 нм и менее).

Четвертая глава посвящена моделированию переноса носителей заряда в транзисторных структурах Si и GaAs в момент формирования КРД с

использованием методов Монте-Карло и молекулярной динамики для оценки временных и пространственных масштабов процессов ионизации и дефектообразования, а также расчета ионизационного тока и изменений проводимости на основе диффузионно-дрейфовых и аналитических моделей. Для Si субмикронных диодов Шоттки представлены результаты моделирования переходных ионизационных процессов, показывающие зависимость амплитуды и времени импульса тока от энергии первичного атома отдачи. Результаты важны для анализа свойств наноразмерных приборов с пикосекундными временами переключения. Показано, что при переходе к технологическим нормам 20 нм и менее, формирование КРД вызывает значительное снижение проводимости канала транзисторов и приводит к сбоям в ячейках памяти. Для GaAs-биполярных транзисторов наибольшее влияние на характеристики оказывает образование кластеров в области эмиттера или в квазинейтральной зоне базы.

Заключение содержит основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты диссертационной работы

1. Разработана методика анализа пространственного распределения радиационных дефектов в полупроводниках при нейтронном воздействии, основанная на двойном применении алгоритма DBSCAN для выявления неперекрывающихся субкластеров с учетом области пространственного заряда и аппроксимации каждого субкластера эллипсоидом для оценки его параметров.

2. Получены оценки размеров субкластеров (5-20 нм) в GaAs-транзисторах с Al и Au затворами (размеры 250 и 100 нм) при нейтронном воздействии, что позволило уточнить концентрацию заряженных дефектов.

3. Показано, что на поверхности кремниевых структур наноразмерные кластеры дефектов при нейтронном воздействии не образуются из-за преобладания ионизационных потерь энергии над ядерными.

4. Выбор потенциала рассеяния на кластерах в Si и GaAs определяется энергией носителей и профилем электрического поля: потенциал «жесткой сердцевины» подходит для слабонеоднородных полей; потенциал Госсика – для термализованных носителей в GaAs-структурах 250 нм и более; потенциал Флеминга – для горячих носителей в Si-наноструктурах 100 нм и менее с резкой неоднородностью поля.

5. Предложена методика расчета переноса носителей в канале транзистора во время формирования кластера, демонстрирующая, что единичный кластер вызывает сбой логического состояния в Si-ячейках статической памяти с нормами 20 нм и менее.

6. Пороговые энергии атомов отдачи в кремнии, вызывающие сбой транзистора за счет формирования кластера, составляют 90-200 кэВ; удельное сечение сбоев для шестиэлементной ячейки (технологии 20 и 7 нм) лежит в диапазоне от 1.1×10^{-15} до 1.5×10^{-14} см/бит.

7. Уменьшение коэффициента усиления по току в GaAs-биполярном транзисторе с базой 115 нм сильно зависит от положения кластера: в переходе эмиттер-база – более чем в 10 раз из-за снижения тока; в квазинейтральной базе – до 3 раз за счет роста рекомбинации; в коллекторе – за счет увеличения сопротивления и снижения тока в активном режиме.

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается применением современных методов теоретического моделирования и апробированных программных комплексов. Выводы исследования находятся в хорошем соответствии с известными литературными данными.

Вместе с тем, диссертационная работа не свободна от недостатков, по работе имеются следующие замечания:

1. В диссертации отмечается, что период перерасчета электрического поля в методе Монте-Карло может определяться величиной, обратной суммарной частоте рассеяния. Однако, для обеспечения численной стабильности и сохранения полной энергии системы (предотвращения численного саморазогрева), этот период обычно ограничивают величиной, обратной плазменной частоте. В связи с этим возникает вопрос: чем обусловлена возможность использования частоты рассеяния в качестве критерия для шага перерасчета поля, если плазменная частота накладывает более строгие и фундаментальные ограничения на стабильность решения?

2. В разделе 2.3.2 значение субкластеров является дискретной расчетно определяемой величиной, не ясно как графики на рисунке 2.16 представлены в непрерывном изменении этой величины.

3. При экспериментальном исследовании микрорельефа поверхностей образцов методом атомно-силовой микроскопии не использовалась техника ямок травления, акцентирующая выход дефектов на поверхности на фоне общей крупномасштабной шероховатости.

4. В главе 4 и положении 4 при модельном расчете учитывается только центральное расположение кластера радиационных дефектов в сечении канала поперек направления тока, тогда как в реальности расположение кластеров случайно, и необходима усредненная оценка.

5. В методике расчета углов рассеяния носителей на кластерах радиационных дефектов функция распределения на рисунке 3.4 для различных потенциалов имеет ярко выраженные различия, тогда как результаты расчетов и сопоставление с экспериментом в таблицах 3.3 и 3.4 показывает довольно слабое отличие.

6. Работа не свободна от погрешностей оформления: таблица 3.6 содержит колонку «среднее расстояние между СКРД, нм» без значений.

Отмеченные замечания не снижают в целом общую высокую оценку работы и продемонстрированный уровень ее научной и практической значимости.

Автореферат диссертации достаточно полно отражает содержание и результаты диссертационной работы. Результаты исследования представлены

в докладах на международных и всероссийских конференциях, а также опубликованы в рецензируемых журналах, индексируемых международными базами данных Web of Science и Scopus, а также в изданиях, рекомендованных ВАК. В приложении имеются данные об использовании результатов работы при выполнении НИОКР в филиале ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю. Е. Седатова», а также о внедрении в учебный процесс Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского.

Заключение

С учетом изложенного считаю, что диссертационная работа Забавичева Ильи Юрьевича «Отклик носителей заряда в Si и GaAs наноразмерных структурах на нейтронное воздействие с учетом динамики вторичных процессов дефектообразования и ионизации» является завершенным научным исследованием, выполненным на высоком профессиональном уровне. Диссертационная работа полностью соответствует паспорту специальности 2.2.2. и удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» (постановление Правительства РФ №842 от 24.09.2013 в действующей редакции), а ее автор, Забавичев Илья Юрьевич, заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Официальный оппонент: профессор кафедры физики конденсированных сред института нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»
доктор физико-математических наук по специальности 2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств, доцент

115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31

Тел.: 8 (495) 788 56 99, E-mail: isvasilyevskij@mephi.ru

«___» 11 НОЯ 2025 2025 г.  Васильевский Иван Сергеевич
(подпись)

Согласен на обработку персональных данных

«___» 11 НОЯ 2025 2025 г.  Васильевский Иван Сергеевич
(подпись)



НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА
АУП и УВП
МИКИРОВА Н.О.
И

Горшков завершил
17.11.25