

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГУП «ВНИИА»

доктор экономических наук

С.Ю. Лопарев

2025 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова» (ФГУП «ВНИИА»)

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 нанoeлектроники, квантовых устройств

Диссертация посвящена исследованию отклика носителей заряда в Si и GaAs наноразмерных структурах на нейтронное воздействие с учетом динамики вторичных процессов дефектообразования и ионизации, позволяющему решить важную задачу оценки реакции перспективных наноразмерных приборов на радиационное воздействие.

Актуальность темы исследования. В современных аналоговых приборах нанoeлектроники, функционирующих в терагерцовом диапазоне частот, характерное время пролета носителей заряда через активную область, а также времена переключений состояний ячеек памяти сопоставимы с временами формирования кластера радиационных дефектов (КРД), которые составляют величину порядка 100 фс. Это приводит к необходимости анализа особенностей переноса носителей заряда через формирующийся кластер радиационных дефектов. Одновременно с образованием разупорядоченной области происходит генерация электронно-дырочных пар, вызванная ионизацией объемного полупроводника высокоэнергетичной частицей, приводящая к протеканию импульса тока фемтосекундной длительности. Оценка формы импульса тока с помощью численной модели 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. В этом случае влияние на изменение переноса носителей заряда оказывает не только общее количество кластеров, но то, в какой области прибора они образуются, так как последнее в большей степени определяет степень деградации характеристик прибора.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 185 страниц.

Основные результаты работы:

1. Предложена методика анализа пространственного распределения радиационных дефектов, возникающих в полупроводниковых материалах при облучении нейтронами с различными энергетическими спектрами. В основе методики лежит оригинальный подход: двукратное последовательное применение алгоритма кластеризации DBSCAN к множеству точечных дефектов. Это позволяет с учётом области пространственного заряда выделить неперекрывающиеся субкластеры радиационных дефектов, после чего каждый субкластер аппроксимируется эллипсоидом вращения и оцениваются его пространственные параметры.

2. Установлено, что размеры субкластеров, возникающих под действием нейтронов в GaAs-транзисторных структурах с рабочими областями 250 и 100 нм, составляют 5–20 нм. На основе этих данных были уточнены оценки концентрации заряженных радиационных дефектов.

3. Показано, что на поверхности кремниевых (Si) структур после нейтронного облучения наноразмерные кластеры радиационных дефектов не формируются. Это связано с тем, что при характерных значениях средней энергии первичных атомов отдачи в кремнии ионизационные потери значительно превосходят потери на образование вторичных атомов отдачи.

4. Продемонстрировано, что выбор 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.

5. Разработана методика для расчета изменений в переносе носителей заряда в канале транзистора при формировании кластера радиационных дефектов. С её помощью установлено, что даже одиночный такой кластер может вызвать сбой логического состояния в ячейках статической памяти, которые состоят из кремниевых транзисторов с техпроцессом 20 нм и менее.

6. Показано, что в кремнии формирование одиночного кластера радиационных дефектов, способного кратковременно «закрыть» ранее открытый транзистор, происходит при пороговых энергиях отдачи 90–200 кэВ. Для шеститранзисторной ячейки (20 и 7 нм) удельное сечение сбоя - 1.1×10^{-15} до 1.5×10^{-14} см/бит.

7. Установлено, что положение единичного кластера радиационных дефектов определяет степень деградации коэффициента усиления по постоянному току в GaAs биполярном транзисторе с тонкой базой (115 нм). Формирование кластера в переходе эмиттер-база вызывает наиболее сильное падение усиления (более чем в 10 раз) за счет уменьшения тока. В то же время, его появление в квазинейтральной базе приводит к снижению усиления до 3 раз из-за роста рекомбинации, а в коллекторе — к падению тока из-за возросшего сопротивления.

Научная новизна. В диссертации установлено, что разделение кластера радиационных дефектов на субкластеры в кремнии происходит на завершающей стадии термического расширения либо в ходе первичной стабилизации, что определяет их размеры; следовательно, рассматривать КРД/СКРД как единый центр рассеяния корректно лишь при временах больших, чем 100 пс. Проведены расчеты деградации подвижности в Si и GaAs при облучении мгновенными нейтронами спектра деления с учетом различий потенциалов рассеяния, показана необходимость их учета в резко неоднородных и нестационарных электрических полях. Предложен механизм обратимого сбоя в ячейке статической памяти, обусловленного формированием одиночного КРД. Показано, что положение КРД критически влияет на транспорт носителей в GaAs-биполярном транзисторе с тонкой базой; максимальное снижение коэффициента усиления по постоянному току возникает при формировании КРД в области эмиттерного перехода.

Практическая значимость. В диссертационной работе решена актуальная задача по созданию программно-математического обеспечения для теоретического анализа распределения радиационных эффектов в полупроводниковых приборах. Автором разработан комплекс программ, позволяющий анализировать пространственно-временную эволюцию кластеров радиационных дефектов и оценивать их влияние на характеристики современных Si и GaAs наноразмерных диодных и транзисторных структур. Получены количественные оценки деградации параметров транзисторов на основе Si и GaAs, а также рассчитаны сечения одиночных сбоев для ячеек памяти, выполненных по современным технологическим нормам (20 нм и 7 нм).

Таким образом, в работе создан и верифицирован эффективный инструмент для прогнозирования реакции широкого спектра полупроводниковых приборов на радиационное воздействие, что определяет высокую практическую ценность исследования.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций. Достоверность обусловлена значительным объемом проведенных исследований с помощью современных методов. Результаты диссертации в достаточной мере отражены в публикациях. По теме диссертации опубликовано 18 статей в рецензируемых изданиях, рекомендованных перечнем ВАК (из них 11 статей — в журналах, индексируемых в международных базах

данных Web of Science и Scopus). Результаты, изложенные в диссертации, докладывались на научных конференциях и семинарах.

Диссертация и автореферат аккуратно оформлены, текст автореферата достаточно полно и точно отражает содержание диссертации.

Результаты и выводы, приведенные в диссертации, **могут быть рекомендованы** к использованию на предприятиях, занимающихся разработкой и практической деятельностью в области создания и применения аппаратуры и приборов, предназначенных для работы в условиях воздействия радиации. Полученные автором результаты нашли свое применение для решения научно-практических задач 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».

Замечания по работе:

1. Параметризация потенциалов для расчета рассеяния проведена на основе длительных экспериментов по изменению подвижности. Эти же параметры используются для расчета влияния КРД в течении 100 пс после их возникновения.

2. В подразделе 3.5 для анализа влияния нейтронного облучения концентрация КРД является подгоночным параметром под результаты эксперимента. Для различных потенциалов концентрации отличаются на 2 порядка. При этом определенному значению дозы соответствует лишь одно значение концентрации. Соответственно возникает о вопрос о правомерности использования рассматриваемых потенциалов для анализа такого класса экспериментов.

Отмеченные замечания носят частный характер и не снижают общую положительную оценку диссертации.

Заключение. Диссертация «Отклик носителей заряда в Si и GaAs наноразмерных структурах на нейтронное воздействие с учетом динамики вторичных процессов дефектообразования и ионизации» Забавичева Ильи Юрьевича, представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, является законченным научным исследованием, в котором предложен оригинальный подход к анализу процессов переноса носителей заряда в современных полупроводниковых приборах в момент воздействия потока нейтронов, и разработаны методы моделирования реакции полупроводниковых приборов на радиационное воздействие в рамках предложенного подхода.

Диссертационная работа соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор, Забавичев Илья Юрьевич, заслуживает присуждения ему

ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности

2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Диссертация и отзыв обсуждены и одобрены на заседании научно-технического семинара научно-теоретического отделения 031 «Центр фундаментальных и прикладных исследований» ФГУП «ВНИИА», протокол № 8 от 01.11.2025 г.

Отзыв составили:

Начальник отделения 031

доктор физико-математических наук

Куратов Сергей Евгеньевич

Начальник отдела 0171

кандидат физико-математических наук

Янилкин Алексей Витальевич

Подпись Куратова Сергея Евгеньевича, Янилкина Алексея Витальевича заверяю.

Ученый секретарь НТС ФГУП «ВНИИА»

к.т.н.



Феоктистова Любовь Валерьевна

Полное название организации: Федеральное государственное унитарное предприятие
«Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова»

Адрес: 127030, Москва, ул. Сущевская, д. 22.

Телефон: (499) 978-7803; Факс: (499) 978-0903; e-mail: vniiia@vniiia.ru