

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
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

Развитие элементной базы полупроводниковой электроники в первую очередь связано с сокращением размеров активных областей полупроводниковых структур, что позволяет повысить предельную частоту аналоговых приборов и тактовую частоту цифровых. В связи с развитием областей применимости элементной базы в приборах космического и специального применения, где они могут подвергаться воздействию отдельных ядерных частиц (протонов, нейтронов и тяжелых заряженных частиц) становится наиболее актуальным вопрос исследования их влияния на параметры приборов. Когда характерное время пролета носителей заряда через активную область, а также времена переключений состояний ячеек памяти сопоставимы с временами формирования кластера радиационных дефектов, составляющее величину порядка 100 фс, становится необходимым анализ особенностей переноса носителей заряда через формирующийся кластер радиационных дефектов. Не только временные, но и пространственные масштабы даже одного кластера становятся сопоставимы с размерами активных областей современных полупроводниковых приборов. В этом случае особенно актуальными становятся вопросы не только общего количества кластеров, но и места их образования, так как от последнего будет зависеть возможность и степень деградации прибора.

В этой связи, диссертационная работа Забавичева И.Ю., посвященная исследованию отклика носителей заряда в Si и GaAs наноразмерных структурах на нейтронное воздействие с учетом динамики вторичных процессов дефектообразования и ионизации является весьма актуальной.

Диссертация включает в себя введение, четыре главы, заключение и списка цитируемой литературы.

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

В **первой главе** представлен обзор текущего состояния проблемы по оценке реакции наноразмерных диодных и транзисторных структур на воздействие радиации. В главе обосновывается выбор структур для

исследований, которые наиболее чувствительны к процессам, протекающим при формировании кластера радиационных дефектов. Короткие структуры диодов Шоттки и Мотта, в которых реализуется эффект всплеска скорости в пространстве, позволяют достигать рабочих терагерцевых частот. Повышение быстродействия транзисторных структур связано с движением носителей заряда в канале транзистора, которое носит квазибаллистический характер. Однако при формировании кластера радиационных дефектов в рабочей области транзистора возможна реализация механизма сбоя состояния ячейки транзисторной памяти, в состав которой входит пораженная область.

Во **второй главе** детально рассмотрено численное моделирование образования кластеров радиационных дефектов в полупроводниковых структурах при взаимодействии нейтронов с атомами вещества. Предложена методика анализа распределения радиационных дефектов внутри кластера, которая позволяет проводить детальную оценку параметров кластера и их изменения во времени. С помощью предложенной методики были исследованы кластеры радиационных дефектов, образованные первичными атомами отдачи с различной энергией в Si, GaAs, Ge и GaN.

В **третьей главе** представлены результаты моделирования транспорта носителей заряда в Si- и GaAs-наноструктурах с учетом их рассеяния на кластерах радиационных дефектов. Результаты расчетов изменения подвижности носителей сопоставлены с экспериментальными данными, определены границы применимости исследуемых потенциалов.

В **четвертой главе** описаны результаты моделирования влияния формирования единичных кластеров радиационных дефектов на характеристики Si и GaAs транзисторных структур. Для Si-транзисторов современных топологических норм (20 нм и 7 нм) определены пороговые энергии первичных атомов отдачи, вызывающие сбой в ячейках памяти. Показано, что с уменьшением проектных норм с 20 до 7 нм порог возникновения сбоя снижается со 100–200 кэВ до 30–40 кэВ. Для биполярных GaAs-транзисторов с тонкой базой установлено, что максимальная деградация параметров происходит, когда кластера радиационных дефектов формируется в области эмиттера или в удаленной от перехода части квазинейтральной базы.

В **заключении** приведены основные результаты диссертационной работы.

Наиболее важные результаты работы

1. Предложена методика, которая позволяет исследовать пространственное распределение радиационных дефектов, созданных в полупроводниках нейтронным облучением. Суть подхода заключается в двойном применении алгоритма кластеризации DBSCAN для выделения из множества точечных дефектов отдельных субкластеров (с учетом области пространственного заряда). Затем форма каждого субкластера

аппроксимируется эллипсоидом вращения для оценки его пространственных характеристик.

2. Определены характерные размеры субкластеров, формирующихся при нейтронном воздействии в GaAs-транзисторных структурах с затворами из Al и Au и размерами рабочих областей 250 и 100 нм; они лежат в диапазоне 5–20 нм, что позволило уточнить существующие оценки концентрации локализованных заряженных радиационных дефектов.

3. Установлено, что на поверхности Si-структур не происходит формирования наноразмерных кластеров радиационных дефектов после нейтронного облучения. Данный эффект обусловлен тем, что при характерной для кремния средней энергии первичного атома отдачи доминирующим механизмом энергетических потерь является ионизация, а не генерация вторичных атомов отдачи.

4. Показана физическая обоснованность использования потенциалов Госсика и Флеминга для оценки последствий нейтронного облучения в сравнении с потенциалом «жесткой сердцевины», а также определены области их применения:

- потенциал Госсика - для описания рассеяния термализованных носителей в GaAs-приборах (≥ 250 нм) на кластерах в целом;
- потенциал Флеминга - для описания рассеяния горячих квазибаллистических носителей на субкластерах в Si-наноприборах (≤ 100 нм), что обусловлено неоднородностью поля в каскаде атомных смещений.

5. Представлена методика количественного анализа изменения переноса носителей заряда в канале транзистора при формировании кластера радиационных дефектов. На её основе показано, что образование одного кластера вызывает нарушение логического состояния ячеек статической памяти на кремниевых транзисторах с техпроцессом 20 нм и меньше.

6. Определен диапазон пороговых энергий атомов отдачи в кремнии, которые формируют единичный кластер радиационных дефектов, составляющий от 90 до 200 кэВ. Такой кластер, образованный в активной области нанотранзистора, способен вызвать его кратковременный сбой. Для шестиэлементной ячейки памяти, выполненной по технологиям 20 и 7 нм, удельное сечение сбоев, вызванных данным механизмом, составляет от 1.1×10^{-15} до 1.5×10^{-14} см/бит.

7. Снижение коэффициента усиления по постоянному току GaAs биполярного транзистора с базой 115 нм определяется положением одиночного кластера дефектов: в переходе эмиттер–база – уменьшение более чем в 10 раз из-за падения тока; в квазинейтральной базе – до 3 раз из-за усиленной рекомбинации; в сильно легированном коллекторе – через рост его сопротивления и, как следствие, уменьшение тока в активном режиме.

Достоверность и обоснованность результатов и положений, выносимых на защиту, обеспечиваются объемом проведенных исследований с помощью

современных методов численного моделирования и сравнения полученных результатов с имеющимися экспериментальными данными.

Тем не менее, по тексту диссертации имеется несколько вопросов/замечаний:

1. В таблице 1.4 диссертационной работы не указаны методы нестационарной емкостной и токовой спектроскопии глубоких уровней как один из возможных экспериментальных методов исследования структуры кластеров радиационных дефектов.

2. Два раза с одним названием указан рисунок 1.8.

3. В диссертационной работе для кремния и арсенида галлия найден целый набор коэффициентов, связывающий концентрацию рассеивающих центров и флюенс нейтронов, значение которых зависит от потенциала рассеяния, вида рассеивающего центра (кластера или субкластера радиационных дефектов), атомного номера первичного атома отдачи. Вместе с тем остается неясным, какие значения коэффициентов следует использовать для практических расчетов сбое- и отказоустойчивости элементов микро- и нанoeлектроники при радиационном воздействии;

4. Работа не свободна от опечаток: ссылка на стр.109 оформлена некорректно – «[25+2]»; на рисунке 4.15 подпись по оси ординат не имеет размерности.

Отмеченные замечания не снижают высокий уровень научной и практической значимости работы.

Заключение

Диссертационная работа Забавичева И. Ю. представляет собой цельное и законченное научное исследование, содержащее неоспоримые новые научные результаты и имеющее несомненную практическую значимость. Тематика и содержание диссертации полностью соответствуют специальности 2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств. Основные результаты работы опубликованы в 78 научных работах, в том числе, в 18 статьях в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных результатов диссертации.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

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 законченной научной квалификационной работой, отвечающей всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013, предъявляемым к диссертационным работам, представленным на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Забавичев Илья Юрьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. –

Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Официальный оппонент:

ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Элементная база нанoeлектроники» института интегральной электроники имени академика К. А. Валиева федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», кандидат технических наук по специальности 05.27.01. – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

124498, г. Москва, Зеленоград, пл. Шокина, 1,
Тел.: 8 (499) 731-44-41, E-mail: egorkinvi1962@mail.ru

«06» ноября 2025 г.  Егоркин Владимир Ильич
(подпись)

Согласен на обработку персональных данных

«06» ноября 2025 г.  Егоркин Владимир Ильич
(подпись)

Подпись Егоркина В. И. заверяю

З. секретарь УС МИЭТ



А.В. Курлов