

На правах рукописи



ПУЗАНОВ АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ

**ПЕРЕНОС ЭЛЕКТРОНОВ В ТРАНЗИСТОРНЫХ СТРУКТУРАХ В
СИЛЬНЫХ РЕЗКОНЕОДНОРОДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОТОКА КВАНТОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2011 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» и в Федеральном государственном унитарном предприятии «Федеральный научно-производственный центр Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»

Научный руководитель: доктор технических наук,
доцент Оболенский С.В.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Тетельбаум Д.И.
кандидат физико-математических наук,
доцент Козлов В.А.

Ведущая организация: Институт ядерной энергетики и технической физики Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Защита состоится «21» декабря 2011 г. в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.166.01 при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу 603950, г. Н. Новгород, пр. Гагарина, 23/3, конференц-зал

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Автореферат разослан «___» ноября 2011 г.

Отзывы направлять по адресу: 603950, г. Н. Новгород, пр. Гагарина, 23/3

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.166.01
доктор физико-математических наук, профессор



Машин А.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Диссертация посвящена исследованию переноса электронов в биполярных транзисторных структурах в сильных резконеоднородных электрических полях при воздействии потока квантов высоких энергий (от 10 кэВ до 10 МэВ), позволяющему решить важную задачу прогнозирования и повышения радиационной стойкости перспективной элементной базы в условиях существенного ограничения объема экспериментальных исследований.

Актуальность проблемы. Развитие полупроводниковой электроники, связанное с уменьшением размеров активной области приборов, открывает новые перспективы перед современной радиоэлектронной аппаратурой. Вместе с тем во многих практических случаях применения (космическая, военная области и т.п.) к данной аппаратуре и электронной компонентной базе, входящей в ее состав, предъявляются повышенные эксплуатационные требования, в частности по радиационной стойкости.

В настоящее время накоплен обширный теоретический и экспериментальный материал по вопросам воздействия ионизирующих излучений различной природы на полупроводниковые приборы с характерными размерами рабочих областей свыше 300...500 нм [1]. Однако исследования функционирования транзисторных структур с характерными размерами менее 150...200 нм при радиационном воздействии только начинаются.

Уменьшение рабочих областей полупроводниковых приборов до размеров порядка длины релаксации энергии (50...150 нм для электронов в кремнии) приводит к принципиальному изменению физических процессов движения носителей заряда в коротких структурах [2]. В нормальных условиях функционирования это проявляется через нелокальную связь между напряженностью электрического поля и усредненными характеристиками электронно-дырочного газа в рабочей области полупроводникового прибора – пространственно-временными профилями средней энергии и скорости носителей заряда. В субмикронных биполярных транзисторах СВЧ и КВЧ диапазонов движение электронов в базе с толщиной менее 150 нм становится практически безстолкновительным, то есть реализуются условия квазибаллистического режима переноса носителей заряда. Такую базу, в которой движение электронов носит безстолкновительный характер, далее в работе будем называть *тонкой*. Другой особенностью данных транзисторов является наличие электрических полей высокой напряженности в области пространственного заряда коллекторного перехода с характерным масштабом неоднородности порядка длины релаксации энергии и импульса электронного газа. В этих условиях кинетические параметры электронного газа становятся нелокальной функцией напряженности электрического поля. В транзисторных структурах с таким пространственным профилем напряженности электрического поля, называемым в работе *резконеоднородным*, электроны в отсутствие облучения «не успевают» набрать энергию, достаточную для ударной ионизации.

Ионизирующее излучение создает горячие электронно-дырочные пары в полупроводниковой структуре. Превышение начальной энергии радиационно-генерированных электронов над равновесной энергией электронного газа при-

водит к разогреву электронного газа и усилению процессов, связанных с *ударной ионизацией*. Современные полупроводниковые приборы часто работают при напряжениях смещения на переходах, близких к напряжению лавинного пробоя. В отсутствие ионизирующего излучения напряженность электрического поля в области пространственного заряда, обедненной подвижными носителями, недостаточна для развития лавинного пробоя в таких структурах. При воздействии потока квантов высоких энергий происходит дополнительный разогрев электронного газа, что приводит к развитию лавинного, а в ряде случаев и теплового пробоя.

Разогрев электронного газа потоком квантов высоких энергий особенно ярко проявляется в биполярных транзисторах с тонкой базой, так как горячие радиационно-генерированные электроны, имея энергию, значительно (до 30 раз) превосходящую равновесную энергию электронного газа, проходят через тонкую базу, не успевая термализоваться. Это приводит к повышению средней энергии электронов, вбрасываемых в обедненную подвижными носителями область пространственного заряда коллекторного перехода и сильному изменению темпа ударной ионизации и амплитуды лавинного тока. Таким образом, лавинный пробой, стимулированный воздействием потока квантов высоких энергий, определяется в основном условиями переноса горячих радиационно-генерированных электронов в базе и их вброса в область пространственного заряда коллектора, а не процессами набора энергии в самой этой области.

Решению этих вопросов, а именно, моделированию переноса электронов в Si и SiGe транзисторных структурах в сильных резконеоднородных электрических полях при воздействии потока квантов высоких энергий, прогнозированию стойкости существующих биполярных транзисторов к воздействию импульсного потока квантов высоких энергий и разработке методов расчета стойких к импульсным ионизирующим воздействиям Si и SiGe биполярных транзисторов с тонкой базой посвящена данная диссертация.

Состояние исследований по проблеме. В настоящее время существует два принципиально различных подхода к моделированию работы полупроводниковых приборов.

Радиотехнический подход основан на замене исследуемого полупроводникового прибора его эквивалентной схемой. Позволяя проводить расчет радиотехнических схем в целом, данный метод весьма слабо учитывает вышеперечисленные физические эффекты, связанные с разогревом электронного газа в сильных резконеоднородных электрических полях при воздействии потока квантов высоких энергий.

Другим подходом к моделированию работы полупроводниковых приборов является физико-топологический подход, основанный на решении кинетического уравнения Больцмана в различных приближениях. Наиболее распространенным в настоящее время методом численного решения кинетического уравнения Больцмана является метод частиц. В литературе представлены работы по моделированию методом Монте-Карло переноса электронов в объемном кремнии при воздействии мягкого рентгеновского излучения [3-5], однако отсутствует анализ эффектов комплексного разогрева электронного газа электри-

ческим полем и потоком квантов высоких энергий с учетом явления ударной ионизации в полупроводниковых приборах. Рассмотрение данного комплекса физических процессов требует моделирования переноса электронов вплоть до энергий, при которых ударная ионизация становится доминирующим механизмом рассеяния (свыше 5 эВ в случае кремния). При этом средняя длина пробега радиационно-генерированного электрона составляет не более 10 нм, что определяет пространственное разрешение предложенной модели.

Более простым методом анализа переноса носителей заряда, имеющим существенно меньшее число настраиваемых параметров, является квазигидродинамический подход, основанный на решении уравнений баланса энергии и импульса для электронов и дырок. Однако замена интегро-дифференциального кинетического уравнения Больцмана на систему дифференциальных уравнений в частных производных требует оценки погрешности решения в случае функции распределения носителей заряда по энергии, отличной от распределения Максвелла, реализуемой в полупроводниковых структурах с сильными резконеоднородными электрическими полями или при воздействии потока квантов высоких энергий.

Таким образом, предлагаемый для анализа действия ионизирующего излучения на полупроводниковые приборы подход должен позволять:

1. Моделировать перенос носителей заряда в Si и SiGe биполярных транзисторных структурах с характерными размерами рабочих областей более 50 нм в сильных резконеоднородных электрических полях с учетом явления ударной ионизации, генерации неравновесных горячих носителей заряда и дополнительного нелокального разогрева электронного газа, вызванных воздействием потока квантов высоких энергий, при нормальных и повышенных температурах полупроводникового кристалла в диапазоне 300...500 К и произвольной форме функции распределения носителей заряда по энергии.
2. Моделировать токовый отклик Si и SiGe биполярных транзисторов с характерными размерами рабочих областей более 50 нм при напряжениях смещения на p-n переходах, близких к напряжению лавинного пробоя, на воздействие импульсного потока квантов высоких энергий.
3. Использовать результаты аналитических оценок и экспериментальных данных в качестве начального приближения численных моделей, а также для уточнения их настраиваемых параметров.

Цель диссертационной работы: Разработка методов и средств расчетно-экспериментального моделирования физических процессов в Si и SiGe биполярных транзисторах с тонкой базой при воздействии импульсного потока квантов высоких энергий с учетом совместно действующего комплекса эффектов: баллистического ограничения скорости неосновных носителей заряда в базе, разогрева электронного газа электрическим полем и потоком квантов высоких энергий, функции распределения горячих носителей заряда по энергии, отличной от распределения Максвелла, адиабатического нагрева рабочей области транзистора импульсом тока и связанного с вышеперечисленным комплексом

физических эффектов изменением темпа ударной ионизации в области пространственного заряда коллекторного перехода.

Решаемые задачи:

1. Разработка комплекса математических моделей переноса носителей заряда в мощных биполярных транзисторах с тонкой базой в диапазоне температур кристалла 300...500 К при воздействии импульсного потока квантов высоких энергий на основе локально-полевого, квазигидродинамического приближений и метода Монте-Карло и его реализация в виде пакета прикладных программ.
2. Аprobация разработанного пакета прикладных программ на основе сравнения результатов моделирования радиационно-стимулированного лавинно-теплого пробоя с экспериментальными данными, полученными в диссертационной работе, для биполярных транзисторов СВЧ диапазона.
3. Теоретический анализ физических процессов переноса носителей заряда при воздействии импульсного ионизирующего излучения на биполярные транзисторы СВЧ диапазона с целью прогнозирования их стойкости к воздействию потока квантов высоких энергий.

Научная новизна

1. Впервые разработана аналитическая модель переходных ионизационных процессов в биполярном транзисторе с тонкой базой при воздействии импульсного потока квантов высоких энергий с учётом баллистического переноса радиационно-генерированных электронов.
2. Впервые теоретически и экспериментально показано, что в мощных биполярных транзисторах с квазibalлистическим переносом электронов в базе характерное время трансформации радиационно-стимулированного пробоя из обратимого лавинного в необратимый тепловой составляет не более 30...100 нс, что указывает на адиабатический характер нагрева рабочей области транзистора.
3. Впервые теоретически установлена зависимость темпа ударной ионизации в коллекторных переходах биполярных транзисторах с тонкой базой при воздействии потока квантов высоких энергий от степени подавления процессов термализации горячих радиационно-генерированных электронов в базе.
4. Впервые теоретически показано, что перераспределение заселенностей электронов между X- и L-долинами кремниевых структур биполярных транзисторов при комплексном разогревающем воздействии потока квантов высоких энергий и электрического поля ведет к усилению темпа ударной ионизации до 12 раз по сравнению с аналогичной ситуацией в отсутствие облучения при напряженности электрического поля менее 200 кВ/см и его ослаблению в полях более 300 кВ/см в субмикронных структурах.

Практическая значимость

1. Предложены аналитические аппроксимации времен релаксации энергии и импульса электронного газа в кремнии в диапазоне средних энергий от 0,04 эВ до 2 эВ, соответствующим напряженностям электрического поля

до 500 кВ/см, при повышенных температурах полупроводникового кристалла 300...500 К, позволяющие расширить температурный диапазон применимости квазигидродинамического приближения для анализа переноса электронов в субмикронных структурах, в том числе при воздействии потока квантов высоких энергий.

2. Получено аналитическое выражение для импульса тока, стимулированного ионизирующим излучением, с учетом баллистического предела скорости носителей заряда в тонкой базе. Использование предложенной аналитической модели в системах автоматизированного проектирования позволяет моделировать ионизационную реакцию фрагментов радиоэлектронной аппаратуры, содержащих биполярные транзисторы СВЧ и КВЧ диапазонов.
3. На основе экспериментального анализа вольтамперных и вольтфарадных характеристик коллекторных переходов, апробации методики моделирования радиационно-стимулированного лавинно-теплого пробоя мощных СВЧ биполярных транзисторов и оптимизации специальных электрических режимов работы предложена процедура отбора мощных СВЧ биполярных транзисторов, обладающих повышенной радиационной стойкостью (на 40...70%) к воздействию импульсных дестабилизирующих воздействий.
4. Разработан пакет прикладных программ для анализа переноса носителей заряда в квазibalлистических кремниевых транзисторных структурах при воздействии импульсного потока квантов высоких энергий, с учетом комплекса одновременно действующих факторов:
 - разогрева электронного газа за счет воздействия потока квантов высоких энергий и электрического поля, вызывающими изменение числа частиц за счет процессов ударной ионизации и радиационной генерации неравновесных электронов, что приводит к отличной от распределения Максвелла функции распределения носителей заряда по энергии;
 - увеличения температуры рабочей области полупроводникового кристалла до 500 К протекающим импульсом тока;
 - изменения темпа ударной ионизации, связанного с нелокальной зависимостью между пространственным профилем напряженности электрического поля и функцией распределения носителей заряда по энергии в субмикронных транзисторных структурах;позволяющий проводить прогнозирование стойкости биполярных транзисторов СВЧ и КВЧ диапазонов к воздействию потока квантов высоких энергий.

Результаты исследований, проведенные в диссертационной работе, использованы в научно-исследовательских работах, проводимых в ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова» в 2007-2011 г.г. и на кафедре электроники радиофизического факультета ННГУ им. Н.И. Лобачевского при подготовке и разработке методического материала по курсам «Твердотельная электроника» и «Физика полупроводниковых приборов», а также специального курса лекций

«Введение в радиационные технологии полупроводников и полупроводниковых приборов».

Положения, выносимые на защиту

1. Предложенная аналитическая модель переходных ионизационных процессов в биполярном транзисторе на основе диффузионно-дрейфового приближения с граничными условиями Хансена на концентрацию позволяет учесть явление баллистического переноса неосновных носителей заряда в тонкой базе при воздействии импульсного потока квантов высоких энергий.
2. Учет температурных зависимостей времен релаксации энергии и импульса для совокупности термо-, ударно- и радиационно-генерированных электронов в квазигидродинамическом приближении, дополненном уравнением теплопроводности, позволяет моделировать радиационно-стимулированный лавинно-тепловой пробой мощных биполярных транзисторов с толщиной базы более 50 нм.
3. При воздействии потока квантов высоких энергий в области резконеоднородного поля коллекторного перехода биполярного транзистора с напряжением коллектор-база незначительно меньшим пробивного значения возникает лавинное умножение носителей заряда, невозможное в отсутствие радиации ввиду недостаточной энергии электронов.

Личный вклад автора в получение результатов

Работы по развитию аналитических и численных математических моделей переноса носителей заряда в биполярных транзисторах СВЧ и КВЧ диапазонов при воздействии импульсного потока квантов высоких энергий [A1-A5, A7-A25] выполнены автором диссертации под руководством Оболенского С.В. Программная реализация алгоритмов, использованных в работе, проведена автором диссертации. Все расчеты, результаты которых представлены в диссертационной работе, проведены автором диссертации.

В экспериментальных исследованиях радиационно-стимулированного лавинно-тепловой пробоя мощного СВЧ биполярного транзистора и схемотехнических методов повышения его устойчивости к катастрофическому отказу [A1, A7-A15, A18, A19] вклад автора является определяющим с точки зрения обработки полученных результатов. Автор непосредственно участвовал в проведении серии облучательных экспериментов [A21].

Методика неразрушающего отбора образцов СВЧ мощных биполярных транзисторов, обладающих повышенной устойчивостью к импульсным дестабилизирующим воздействиям на основе анализа пространственного распределения легирующей примеси рабочей области при помощи комплексных измерений вольтамперных и вольтфарадных характеристик [A2] разработана совместно с научным руководителем Оболенским С.В.

Работы по моделированию переноса носителей заряда в биполярном транзисторе с тонкой базой при воздействии потока квантов высоких энергий [A5], потока нейтронов [A23] и введении конструктивных включений [A22] выполнены автором диссертации под руководством Оболенского С.В.

Публикации и апробация результатов

Основные результаты диссертации представлены в 25 научных публикациях, в том числе: 5 статьях в реферируемых ВАК журналах; 1 методической работе; 19 докладах и тезисах научных конференций: участник XI, XII, XIII и XIV научных конференций по радиофизике; XIII и XIV нижегородских сессий молодых ученых (естественнонаучные дисциплины); VIII и IX межотраслевых конференциях по радиационной стойкости; III всероссийской конференции «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем»; всероссийских научно-технических конференций «Стойкость-2007», «Стойкость-2009», «Стойкость-2010» и «Стойкость-2011»; II и III всероссийских конференций «Физические и физико-химические основы ионной имплантации»; XII международной конференции «Харитоновские чтения»; XVII международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии».

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 160 страниц, включая 75 рисунков, 9 таблиц и список цитируемой литературы из 87 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность направления исследований, состояние проблемы, сформулированы цель и основные задачи диссертационной работы, определены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, личный вклад автора, результаты диссертационной работы и сведения об их апробации.

В первой главе диссертации проводится краткий обзор и анализ работ по воздействию потока квантов высоких энергий на полупроводниковые диоды и биполярные транзисторы. Под квантами высоких энергий здесь и далее понимаются кванты рентгеновского- и гамма диапазонов с энергиями на несколько порядков превышающими ширину запрещенной зоны полупроводника.

В **п.1.1** рассматриваются источники квантов высоких энергий, их характеристики и ионизационные эффекты в полупроводниковых кристаллах: рождение горячих неравновесных носителей заряда и изменение темпа ударной ионизации.

Базовым элементом большинства полупроводниковых приборов является р-п переход. В **п.1.2** рассматриваются физические процессы, протекающие в полупроводниковых структурах с р-п переходами при воздействии потока квантов высоких энергий и коррелированного с ним одиночного импульса напряжения.

В **п.1.3** проводится количественное рассмотрение эффектов переноса носителей заряда в полупроводниковых структурах в сильных резконеоднородных электрических полях путем нахождения функции распределения носителей заряда в координатном и импульсном пространстве и времени. Определяются условия получения решения и границы применимости кинетического уравнения Больцмана.

Особенности переноса носителей заряда, аналитическая модель гетеробиполярного транзистора с тонкой базой на основе SiGe и результаты облучательного эксперимента рассмотрены в п.1.4.

Математические методы анализа переноса носителей заряда при воздействии потока квантов высоких энергий, их особенности, преимущества и недостатки применительно к решению задачи переноса электронов в коротких структурах (с тонкой базой и сильным резконеоднородным электрическим полем в области пространственного заряда коллектора), обсуждаются в п.1.5.

Во второй главе детально рассмотрены математические модели для анализа радиационно-стимулированного лавинно-теплого пробоя в субмикронных биполярных транзисторах СВЧ и КВЧ диапазонов.

Особенности переноса носителей заряда в биполярных транзисторах с тонкой базой и сильным резконеоднородным электрическим полем в области пространственного заряда коллектора требуют как модернизации численных методов расчета, так и создания простой аналитической модели переходных ионизационных процессов в субмикронных полупроводниковых приборах, содержащих р-п переходы. Необходимость создания комплекса взаимодополняемых математических моделей переноса носителей заряда для анализа радиационно-стимулированного лавинно-теплого пробоя в биполярных транзисторах СВЧ и КВЧ диапазонов, а также связанные с этим методические вопросы обсуждаются в п.2.1 диссертационной работы.

В п.2.2 предложена новая аналитическая модель переходных ионизационных процессов, протекающих в тонкой базе биполярного транзистора при воздействии импульсного потока квантов высоких энергий, с учетом баллистического предела скорости носителей заряда. Традиционная модель не учитывает баллистическое ограничение скорости носителей заряда, что приводит к неограниченному возрастанию тока в тонких структурах. Проведенный расчет по предложенной модели показывает, что в силу конечности предельной скорости носителей заряда при уменьшении размеров области диффузионного переноса до длины релаксации импульса электронно-дырочного газа амплитуда протекающего тока перестает зависеть от коэффициента диффузии и выходит на насыщение по указанному параметру (рис. 1).

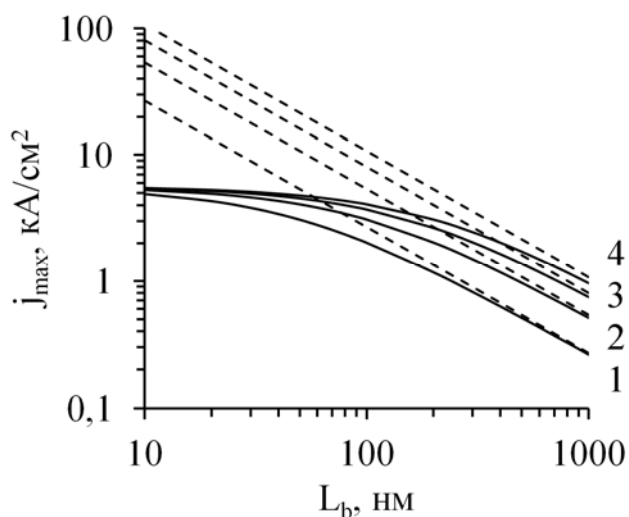


Рис. 1. Амплитуда тока биполярного транзистора в момент воздействия δ -импульса ионизирующего излучения, приводящего к генерации $4,2 \cdot 10^{13}$ пар $\text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ неравновесных носителей заряда. Расчет без учета (---) и с учетом (—) баллистического предела скорости носителей заряда при коэффициенте диффузии неосновных носителей заряда в базе: 1 – 10 $\text{см}^2/\text{с}$, 2 – 20 $\text{см}^2/\text{с}$, 3 – 30 $\text{см}^2/\text{с}$, 4 – 40 $\text{см}^2/\text{с}$ [A25]

В п.2.3 предложен метод учета горячих радиационно-генерированных электронов в полупроводнике, возникающих при воздействии потока квантов высоких энергий. Рассчитан энергетический спектр электронов в кремнии с учетом полной структуры зон и средняя энергия радиационно-генерированных электронов, равная 0,73 эВ. Полученный результат был использован в качестве параметра квазигидродинамической модели при моделировании радиационно-стимулированного лавинно-теплового пробоя мощного сверхвысокочастотного биполярного транзистора.

В п.2.4 из экспериментальных и расчетно-теоретических результатов получены аналитические аппроксимации времен релаксации энергии и импульса электронного газа в кремнии в диапазоне средних энергий от 0,04 эВ до 2 эВ при повышенных температурах полупроводникового кристалла 300...500 К (рис. 2). В отличие от расчета времен релаксации в приближении эллипсоидальной параболической модели зон [6], полученный результат учитывает отличие зависимости времени релаксации импульса от функции $W^{0,5}$ и насыщение времени релаксации энергии при средних энергиях электронного газа, существенно превосходящих энергию оптических фононов. Также учтена независимость времени релаксации импульса от средней энергии электронного газа при ее значениях, меньших энергии оптических фононов. Оригинальная модель более точно отвечает результатам, полученным методом Монте-Карло [2].

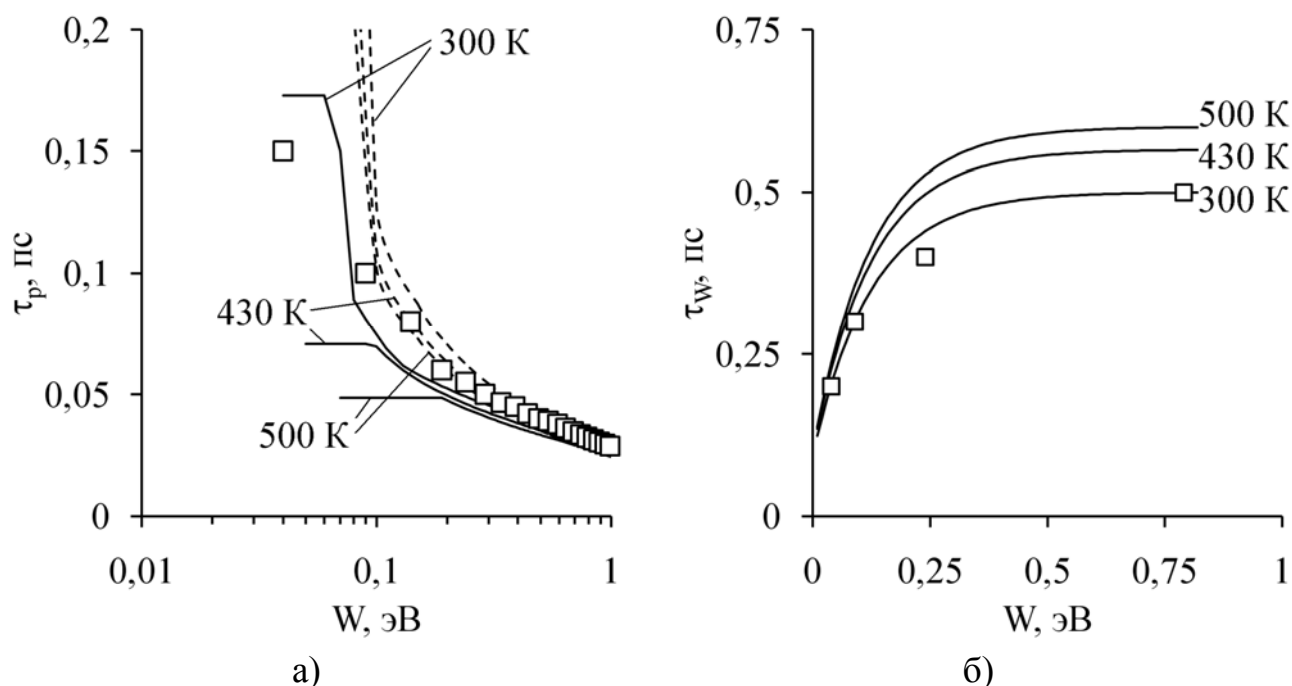


Рис. 2. Зависимости времени релаксации импульса (а) и энергии (б) электронного газа от его средней энергии в нелегированном кремнии для различных температур: (—) – расчет на основе оригинальной модели [А4]; (- - -) – расчет на основе эллипсоидальной параболической модели зон [6]; □ – литературные данные для 300 К [2]

В п.2.5 в приближении распределения Максвелла электронов по энергии и полной зонной структуре кремния рассчитана зависимость электронного ко-

эффициента ударной ионизации от напряженности электрического поля. Погрешность расчета по отношению к экспериментальным данным составляет не более 30% против 50% при расчетах в приближении эллипсоидальной параболической модели зон.

В **третьей главе** приведены результаты экспериментальных исследований динамики развития радиационно-стимулированного лавинно-теплого пробоя в мощных биполярных транзисторах СВЧ диапазона и его интерпретация на основе квазигидродинамической модели.

Общая информация об объекте исследований приведена в **п.3.1**.

Методики измерений электрофизических параметров: вольтамперных и вольтфарадных характеристик коллекторных переходов мощных СВЧ биполярных транзисторов, напряжения лавинного пробоя коллектор-база и схемы измерений тока, протекающего через транзистор во время воздействия импульса ионизирующего излучения, приведены в **п. 3.2**. Показано, что предложенная методика расчета конструктивных параметров мощных СВЧ биполярных транзисторов позволяет получить профиль легирования рабочей области биполярных транзисторов, что позволяет проводить анализ стойкости биполярных транзисторов к воздействию ионизирующего излучения на основе априорных данных и результатов измерений вольтамперных и вольтфарадных характеристик конкретных образцов при помощи аналитических и численных моделей. Также в **п.3.2** приведена методика отбора образцов мощных биполярных транзисторов, обладающих повышенной стойкостью к внешним импульсным воздействиям по величине емкости коллекторного перехода. Показано, что экспериментально полученный 10% разброс значения емкости коллекторных переходов исследуемых мощных СВЧ биполярных транзисторов приводит к 20% разбросу порога развития радиационно-стимулированного лавинно-теплого пробоя.

В **п.3.3** проведено сравнение результатов моделирования радиационно-стимулированного лавинно-теплого пробоя мощного биполярного транзистора СВЧ диапазона с экспериментальными данными (рис. 3). Экспериментально показано, что при напряжении коллектор-база $U_{кб} = 0,9 \cdot U_{кб0}$, где $U_{кб0}$ – напряжение лавинного пробоя коллекторного перехода, порог развития радиационно-стимулированного пробоя составляет $2,5 \cdot 10^{25}$ пар·см⁻³·с⁻¹, время развития пробоя – 80 нс при характерной длительности импульса ионизирующего излучения 25 нс. Радиационно-стимулированный лавинно-тепловой пробой носит двухфазный характер и обусловлен переходом от лавинного пробоя, стимулированного горячими неравновесными радиационно-генерированными носителями, к тепловому пробую и образованию в рабочей области транзистора проводящего канала. Выход тока на постоянное значение при пробое транзистора (на рис. 3 кривая 2) объясняется наличием внутреннего сопротивления источника питания, которое ограничивает ток и не позволяет ему неограниченно возрастать. Экспериментально зарегистрированные осцилляции тока вызваны неоднородностью пучка излучения и электромагнитной наводкой.

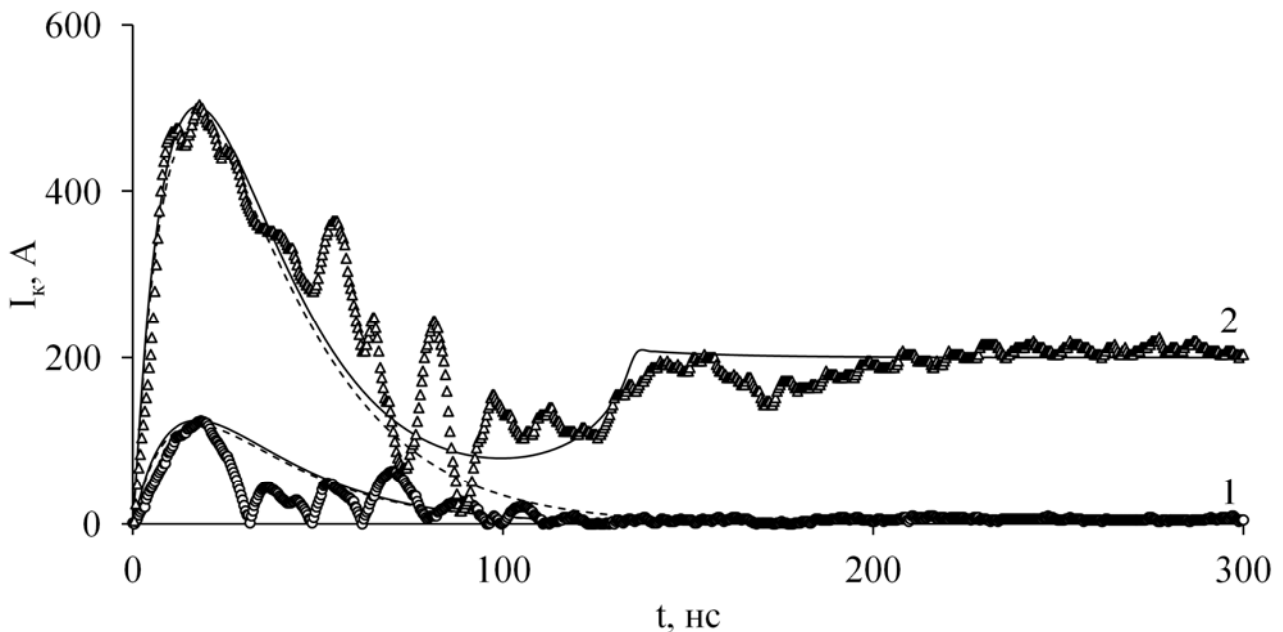


Рис. 3. Зависимость тока, протекающего через коллекторный переход мощного СВЧ биполярного транзистора, от времени при воздействии импульсного потока квантов высоких энергий: (—) – результат численного моделирования на основе квазигидродинамического приближения, (- - -) – аналитическая модель, (○) – экспериментальные данные при уровне генерации $6,3 \cdot 10^{24}$ пар·см⁻³·с⁻¹ – 1, (Δ) – экспериментальные данные при уровне генерации $2,5 \cdot 10^{25}$ пар·см⁻³·с⁻¹ – 2 [A9, A12, A18]

Влияние приложенного к коллекторному переходу напряжения смещения обсуждается в п.3.4. Проведены экспериментальные и теоретические исследования схемотехнических методов повышения стойкости мощного кремниевого СВЧ биполярного транзистора к воздействию импульсного ионизирующего излучения. Благодаря оптимизации электрических режимов работы мощных биполярных транзисторов, осуществленной с помощью оригинального комплекса математических моделей, порог катастрофического отказа транзисторов к воздействию импульсного потока квантов высоких энергий увеличен до 8 раз, что подтверждено экспериментально.

В четвертой главе рассмотрены особенности переноса электронов в n-p-n биполярном транзисторе с тонкой базой и сильным резконеоднородным электрическим полем в области пространственного заряда коллектора.

В п.4.1 проведен анализ разогрева электронного газа в тонкой базе биполярного транзистора при воздействии потока квантов высоких энергий. Теоретически при помощи метода Монте-Карло показано (рис. 4), что при интенсивности воздействия потока квантов высоких энергий, приводящему к генерации $3 \cdot 10^{24}$ пар·см⁻³·с⁻¹, увеличение средней энергии неосновных носителей заряда (электронов) на границе области пространственного заряда коллекторного перехода начинает проявляться при толщине базы менее 300 нм.

В п.4.2 проведено моделирование переноса электронов методом Монте-Карло и рассчитан энергетический спектр электронного газа в области сильного резконеоднородного поля пространственного заряда коллекторного перехода

при воздействии потока квантов высоких энергий. Теоретически при помощи метода Монте-Карло показано, что функция распределения электронов по энергии в субмикронных биполярных транзисторах при воздействии потока квантов высоких энергий существенно отличается от распределения Максвелла. Это обусловлено перераспределением заселенностей электронов между X- и L-долинами, ведущим к усилению темпа ударной ионизации в умеренно сильных и его ослаблению в сильных электрических полях при воздействии потока квантов высоких энергий. Общей закономерностью является увеличение заселенности L-долин (до 30%) в умеренно сильных электрических полях (менее 200 кВ/см) и уменьшению заселенности L-долин (до 40%) в сильных электрических полях (свыше 300 кВ/см) при воздействии потока квантов высоких энергий, что объясняется комплексными процессами разогрева электронного газа электрическим полем и потоком квантов высоких энергий. Применение аналитических и простых численных моделей приводит к завышению коэффициента умножения носителей заряда в 5...12 раз относительно расчета методом Монте-Карло при толщине области сильного резконеоднородного электрического поля коллектора 150...200 нм. С уменьшением толщины области пространственного заряда коллектора это различие будет только возрастать.

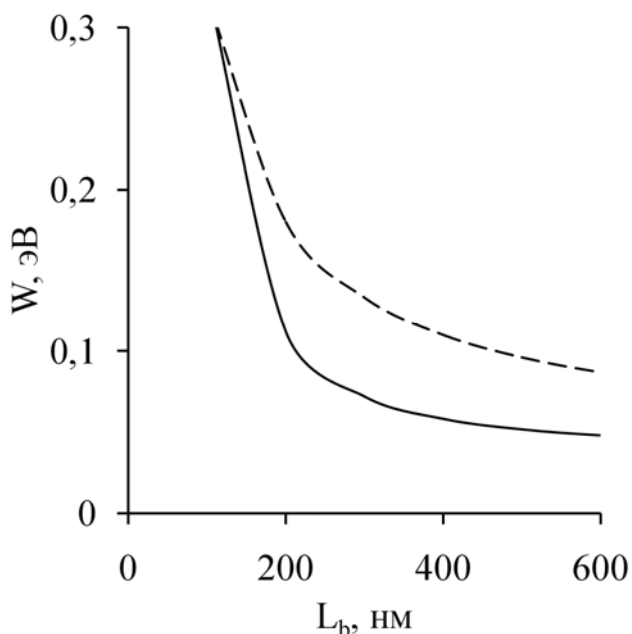


Рис. 4. Зависимость средней энергии электронного газа на границе области сильного резконеоднородного электрического поля пространственного заряда коллекторного перехода, обедненной подвижными носителями в зависимости от толщины базы для биполярного транзистора с диффузионным (—) и дрейфовым (- - -) механизмами переноса электронов в базе при коэффициенте генерации $3 \cdot 10^{24}$ пар·см⁻³·с⁻¹ [А3]

В п.4.3 для повышения устойчивости транзистора к радиационно-стимулированному лавинно-тепловому пробую предложено ввести в коллекторную область транзистора плоскую решетку объемных овальных неоднородностей, легированных примесями, придающими полупроводнику противоположный тип проводимости, то есть такой же, какой имеет база. Теоретически при помощи квазигидродинамической модели показано, что при применении предложенного подхода, не меняя электрические режимы работы транзистора, возможно повысить до 3 раз его устойчивость к радиационно-стимулированному лавинно-тепловому пробую.

В заключении приведены основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В рамках развития численных математических моделей переноса носителей заряда в биполярных транзисторах с тонкой базой и сильным резко-неоднородным электрическим полем в области пространственного заряда коллектора при воздействии импульсного потока квантов высоких энергий:
 - на основе процедуры Монте-Карло предложен метод учета горячих радиационно-генерированных электронов в полупроводнике, возникающих при воздействии потока квантов высоких энергий. На базе разработанного подхода рассчитан энергетический спектр электронов в кремнии с учетом полной структуры зон, позволяющий учесть влияние горячих электронов на развитие радиационно-стимулированного лавинного пробоя, и средняя энергия радиационно-генерированных электронов, равная 0,73 эВ, являющаяся необходимым параметром квазигидродинамической модели при моделировании радиационно-стимулированного лавинно-теплого пробоя;
 - на основе экспериментальных данных и результатов моделирования методом Монте-Карло определены времена релаксации энергии и импульса электронного газа в широком диапазоне температур (300...500 К) кристаллической решетки и средних энергий (до 2 эВ) электронного газа, что позволяет проводить моделирование радиационно-стимулированного лавинно-теплого пробоя в квазигидродинамическом приближении.
2. В рамках моделирования токового отклика при воздействии импульсного потока квантов высоких энергий в биполярных транзисторах СВЧ и КВЧ диапазона:
 - разработана аналитическая модель переходных ионизационных процессов в биполярном транзисторе с тонкой (10...100 нм) базой с учетом баллистического переноса неосновных носителей заряда. Использование предложенной аналитической модели в системах автоматизированного проектирования позволяет моделировать ионизационную реакцию фрагментов радиоэлектронной аппаратуры, содержащих биполярные транзисторы СВЧ и КВЧ диапазонов.
 - исследована динамика развития радиационно-стимулированного лавинно-теплого пробоя мощного кремниевого сверхвысокочастотного биполярного транзистора. Экспериментально показано, что при напряжении $U_{кб} = 0,9 \cdot U_{кб0}$, где $U_{кб0}$ – напряжение лавинного пробоя коллекторного перехода, порог развития радиационно-стимулированного пробоя составляет $2,5 \cdot 10^{25}$ пар·см⁻³·с⁻¹, время развития пробоя – 80 нс при характерной длительности импульса ионизирующего излучения 25 нс.
 - проведены экспериментальные и теоретические исследования схемотехнических методов повышения стойкости мощного кремниевого сверхвысокочастотного биполярного транзистора к воздействию

импульсного потока квантов высоких энергий. Благодаря оптимизации электрических режимов работы мощных биполярных транзисторов, осуществленной с помощью предложенного комплекса математических моделей, порог катастрофического отказа транзисторов к воздействию импульсного потока квантов высоких энергий увеличен до 8 раз, что подтверждено экспериментально.

3. Предложена методика неразрушающего отбора образцов мощных биполярных транзисторов к воздействию одиночных импульсов напряжения и импульсов ионизирующего излучения на основе анализа пространственного распределения легирующей примеси рабочей области при помощи комплексных измерений вольтамперных и вольтфарадных характеристик. Показано, что экспериментально полученный 10% разброс значения емкости коллекторных переходов исследуемых мощных СВЧ биполярных транзисторов приводит к 20% разбросу порога развития радиационно-стимулированного лавинно-теплого пробоя.
4. При помощи метода Монте-Карло с применением процедуры учета радиационно-генерированных электронов проведено моделирование переноса носителей заряда в биполярном транзисторе с тонкой (90 нм) базой. Теоретически показано, что:
 - в тонкой базе биполярного транзистора, радиационно-генерированные электроны не успевают термализоваться, что приводит к увеличению средней энергии электронного газа на границе области сильного резконеоднородного электрического поля пространственного заряда коллекторного перехода, обедненной подвижными носителями. При интенсивности воздействия потока квантов высоких энергий $3 \cdot 10^{24}$ пар·см⁻³·с⁻¹ данный эффект начинает проявляться при толщине базы менее 300 нм.
 - функция распределения электронов по энергии в области сильного резконеоднородного электрического поля коллекторных переходов биполярных транзисторов при воздействии потока квантов высоких энергий существенно отличается от распределения Максвелла-Больцмана. Это обстоятельство является основным источником погрешностей моделирования переноса носителей заряда в субмикронных (менее 50 нм в случае кремния) полупроводниковых структурах при воздействии потока квантов высоких энергий для математических моделей, оперирующих макроскопическими характеристиками электронно-дырочного газа – средней температурой (средней энергией) и средней направленной скоростью. В частности, применение аналитических и простых численных моделей приводит к завышению коэффициента умножения носителей заряда в 5...12 раз относительно расчета методом Монте-Карло при толщине области сильного резконеоднородного электрического поля коллектора 150...200 нм. С уменьшением толщины области пространственного заряда коллектора это различие будет только возрастать;

- перераспределение заселенностей электронов между X- и L-долинами ведет к усилению темпа ударной ионизации в умеренно сильных и его ослаблению в сильных электрических полях при воздействии потока квантов высоких энергий. Общей закономерностью является увеличение заселенности L-долин (до 30%) в умеренно сильных электрических полях (менее 200 кВ/см) и уменьшение заселенности L-долин (до 40%) в сильных электрических полях (свыше 300 кВ/см) при воздействии потока квантов высоких энергий, что объясняется комплексными процессами разогрева электронного газа электрическим полем и потоком квантов высоких энергий. В отсутствии облучения темп ударной ионизации монотонно возрастает с ростом напряженности электрического поля.
5. Проведен анализ конструктивных методов повышения устойчивости мощных биполярных транзисторов к внешним импульсным дестабилизирующим воздействиям. Теоретически показано, что введение в коллекторную область плоской решетки объемных овальных неоднородностей, легированных примесями, придающими полупроводнику противоположный тип проводимости, то есть такой же, какой имеет база, позволяет, не меняя электрические режимы работы мощного биполярного транзистора, повысить до 3 раз его устойчивость к радиационно-стимулированному лавинно-тепловому пробоям.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коршунов Ф. П., Гатальский Г.В., Иванов Г.М. Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах. – М.: Наука и техника, 1978. – 232 с.
2. Пожела Ю.К. Физика быстродействующих транзисторов. – Вильнюс: Мокслас, 1989. – 264 с.
3. McFeely F.R., Cartier E., Terminello L.J., Santoni A., Fischetti M.V. Soft-x-ray-induced core-level photoemission as probe of hot-electron dynamics in SiO₂ // Phys. Rev. Lett. 1990. Vol.65, No.15. P.1937-1940
4. Cartier E., McFeely F.R. Hot-electron dynamics in SiO₂ studied by soft-x-ray-induced core-level photoemission // Phys. Rev. B. 1991. Vol.44, No.19. P.10689-10705
5. Eklund E.A., Kirchner P.D., Shuh D.K., McFeely F.R., Cartier E. Direct determination of impact-ionization rates near threshold in semiconductors using soft-x-ray photoemission // Phys. Rev. Lett. 1992. Vol.68, No.6. P.831-834
6. Зеегер К. Физика полупроводников. – М.: Мир, 1977. – 616 с.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- A1. Пузанов А.С., Оболенский С.В. Особенности стимулированного излучением пробоя p-n перехода с неоднородным легированием // Микроэлектроника. 2009. Т.38, №1. С.64-74
- A2. Пузанов А.С., Оболенский С.В. Влияние разброса электрических характеристик биполярного транзистора на его пробой при воздействии импульса напряжения // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика

- радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2010. Вып.1. С.54-57
- A3. Пузанов А.С., Оболенский С.В. Влияние радиационно-стимулированного разогрева электронного газа на развитие лавинного пробоя в транзисторных структурах // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2010. Вып.3. С.46-50
- A4. Пузанов А.С., Оболенский С.В. Применение квазигидродинамического приближения для решения задачи переноса заряда в кремниевых наноструктурах при повышенных температурах // Вестник ННГУ. Серия: Радиофизика. 2011. Вып.2. С.62-70
- A5. Пузанов А.С., Оболенский С.В., Петров С.Г. Особенности ударной ионизации в полупроводниковых приборах с субмикронными областями пространственного заряда при воздействии потока квантов высоких энергий // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2011. Вып.2. С.10-13
- A6. Битюрин Ю.А., Оболенский С.В., Волкова Е.В., Демарина Н.В., Пузанов А.С., Чириманов А.П. Измерение статических характеристик биполярного транзистора // Практикум. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2009. – 30 с.
- A7. Пузанов А.С., Оболенский С.В. Моделирование вторичного пробоя мощного СВЧ биполярного транзистора при радиационном воздействии // В кн.: Труды XI научной конференции по радиофизике (г. Нижний Новгород, 7 мая 2007 г.) / Под ред. А.В. Кудрина, А.В. Якимова. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2007, С.40
- A8. Пузанов А.С., Оболенский С.В. Моделирование радиационно-стимулированного вторичного пробоя мощного СВЧ биполярного транзистора // В кн.: Научно-технический сборник «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2007» - М.: МИФИ, 2007, С.226
- A9. Оболенский С.В., Пузанов А.С., Качемцев А.Н., Асмолова Н.Ф. Моделирование радиационно-стимулированного теплового пробоя мощного СВЧ биполярного транзистора // VIII Межотраслевая конференция по радиационной стойкости: Сборник докладов (г. Саров, 16-19 октября 2007) – г. Саров: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2008, С.118-121
- A10. Пузанов А.С., Оболенский С.В. Квазигидродинамическое моделирование радиационно-стимулированного теплового пробоя мощного СВЧ биполярного транзистора // XIII Нижегородская сессия молодых ученых. Естественнонаучные дисциплины (г. Нижний Новгород, 20-25 апреля 2008 г.). – Нижний Новгород: «Издательский салон» ИП Гладкова О.В., 2008. С.73-74
- A11. Пузанов А.С. Особенности квазигидродинамической модели для анализа пробоя мощного СВЧ биполярного транзистора при радиационном воздействии с учетом повышенной температуры // В кн.: Труды XII научной конференции по радиофизике (г. Нижний Новгород, 7 мая 2008 г.) / Под

ред. А.В. Якимова, С.М. Грача. Нижний Новгород: Изд-во ТАЛАМ, 2008, С.37-38

- A12. Пузанов А.С., Волкова Е.В., Оболенский С.В., Петров С.Г. Применение квазигидродинамической модели для анализа электронного транспорта в полевых и биполярных транзисторах в условиях импульсного ионизирующего излучения с учетом повышенных температур // В кн.: Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2008. Сборник научных трудов / под общ. ред. А.Л. Стемпковского. – М.: ИППМ РАН, 2008, С.286-291
- A13. Пузанов А.С., Оболенский С.В. Моделирование радиационно-стимулированного теплового пробоя в мощном СВЧ биполярном транзисторе с учетом разогрева электронного газа // II Всероссийская конференция «Физические и физико-химические основы ионной имплантации» (г. Казань, 28-31 октября 2008 г.). – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета, 2008, С.128
- A14. Пузанов А.С., Оболенский С.В. Моделирование переноса носителей тока в коллекторном переходе мощного СВЧ биполярного транзистора с учетом разогрева электронного газа при воздействии импульсного гамма-излучения // XIV Нижегородская сессия молодых ученых. Естественнонаучные дисциплины (г. Нижний Новгород, 19-23 апреля 2009 г.). – Нижний Новгород: «Издательский салон» ИП Гладкова О.В., 2009. С.14
- A15. Оболенский С.В., Пузанов А.С. Влияние разогрева электронного газа на развитие лавинно-теплового пробоя мощного СВЧ биполярного транзистора при радиационном воздействии // В кн.: Труды XIII научной конференции по радиофизике (г. Нижний Новгород, 7 мая 2009 г.) / Под ред. С.М. Грача, А.В. Якимова. Нижний Новгород: Изд-во «ТАЛАМ», 2009, С.37-38
- A16. Пузанов А.С., Оболенский С.В., Петров С.Г. Влияние радиационного разогрева электронного газа на развитие лавинного пробоя в диодных структурах // В кн.: Научно-технический сборник «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2009» - М.: МИФИ, 2009, С.105-106
- A17. Пузанов А.С., Оболенский С.В., Петров С.Г. Влияние разброса профилей легирования биполярных транзисторов на возникновение пробоя при воздействии импульса напряжения // В кн.: Научно-технический сборник «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2009» - М.: МИФИ, 2009, С.107-108
- A18. Асмолова Н.Ф., Качемцев А.Н., Оболенский С.В., Пузанов А.С. Моделирование радиационно-стимулированного лавинно-теплового пробоя мощного СВЧ биполярного транзистора // В кн.: Проблемы физики высоких плотностей энергии. XII Харитоновские тематические научные чтения. Доклады. (г. Саров, 19-23 апреля 2010 г.) Саров: ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ», 2010, С.33-37
- A19. Пузанов А.С., Оболенский С.В. Радиационно-стимулированный пробой мощного биполярного транзистора // В кн.: Труды XIV научной конфе-

ренции по радиофизике (г. Нижний Новгород, 7 мая 2010 г.) / Под ред. С.М. Грача, А.В. Якимова. Нижний Новгород: Изд-во «ГАЛАМ», 2010, С.49-50

- A20. Пузанов А.С., Оболенский С.В. Особенности ударной ионизации в гетероструктурах при воздействии потока квантов высоких энергий // В кн.: Научно-технический сборник «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2010» - М.: НИЯУ МИФИ, 2010, С.103-104
- A21. Агалаков А.Н., Асмолова Н.Ф., Букин Д.В., Довбыш Л.Е., Дюков Д.В., Лукичев А.Н., Оболенский С.В., Орлов Н.Г., Плохой В.В., Пузанов А.С., Труфанов А.Н., Фефелов А.Г., Шукайло В.П. Особенности методики испытаний модулей СВЧ на стойкость к воздействию спецфакторов // В кн.: IX Межотраслевая конференция по радиационной стойкости: Сборник докладов: в 2 т. Т.2 – Снежинск: РФЯЦ – ВНИИТФ, 2011 г., С.83-87
- A22. Асмолова Н.Ф., Качемцев А.Н., Оболенский С.В., Пузанов А.С. Особенности динамики развития пробоя полупроводниковых элементов, стимулированного ионизирующим излучением // В кн.: IX Межотраслевая конференция по радиационной стойкости: Сборник докладов: в 2 т. Т.2 – Снежинск: РФЯЦ – ВНИИТФ, 2011 г., С.88-91
- A23. Пузанов А.С., Оболенский С.В. Изменение транспорта электронов в SiGe гетеробиполярном транзисторе при воздействии потока нейтронов // В кн. Физические и физико-химические основы ионной имплантации: Тезисы докладов III всероссийской конференции (Нижний Новгород, 26-29 октября 2010 г.) – Нижний Новгород, 2010 г., С.94-95
- A24. Асмолова Н.Ф., Киселев В.К., Оболенский С.В., Пузанов А.С. Анализ динамики развития пробоя в биполярном транзисторе с тонкой базой при радиационном воздействии // В кн.: Материалы XVII Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии ИСТ-2011» (г. Нижний Новгород, 2011 г.) / Под ред. В.П. Хранилова. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, 2011, С.60
- A25. Пузанов А.С., Оболенский С.В. Аналитическая модель переходных ионизационных процессов в кремниевых биполярных транзисторах с тонкой базой при воздействии ионизирующего излучения // В кн.: Научно-технический сборник «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2011» - М.: НИЯУ МИФИ, 2011, С.99-100