На правах рукописи

# ЗЫКОВ ВЛАДИМИР МИХАЙЛОВИЧ

# МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУР ПРИ ИОНИЗИРУЮЩЕМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Специальность 01.04.10 - физика полупроводников

# ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук

Томск – 2002

Работа выполнена в НИИ интроскопии при ТПУ и Томском политехническом университете

Научный консультант:

Доктор физико-математических наук, профессор Лисицын В.М.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Войцеховский А.В.

доктор физико-математических наук, профессор Новиков Л.С.

доктор технических наук, Вилисов А.А.

Ведущая организация: НИИ приборов Министерства атомной энергии РФ

Защита состоится 25 июня 2002 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д.212.269.02 при Томском политехническом университете по адресу: 634050, Томск, проспект Ленина,30

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Томского политехнического университета

Автореферат разослан "\_\_\_" 2002 года

Ученый секретарь диссертационного совета доктор физико-математических наук

М.В. Коровкин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Долговременные процессы изменения электрических параметров, которые инициируются ионизирующей радиацией в полупроводниковых приборах, изготовленных на основе кристаллического являются одним из существенных факторов, которые определяют кремния, надежность работы этих приборов в условиях действия факторов космического пространства. Значительная часть инициированных ионизирующими излучениями долговременных процессов связана с захватом неравновесных носителей заряда на ловушки в объеме полупроводника или в изолирующем окисном слое полупроводникового прибора. Примерами таких долговременных процессов являются индуцированная примесная фотопроводимость (ИПФ), наблюдаемая в примесных ИК-фотоприемниках глубокого охлаждения на основе примесного кремния (( $p^+ - p - p^+$ ) и ( $n^+ - n - n^+$ ) структуры), и долговременный отклик структур металл-окисел-полупроводник (например, МОП-транзисторы) на радиационное воздействие, наблюдаемый после воздействия ионизирующей радиацией.

Длительность долговременных процессов радиационного отклика (релаксации) может достигать десятков часов для примесных фотоприемников и нескольких лет для МОП-транзисторов после окончания ионизирующего воздействия и сложным образом зависит от теплового и электрического режимов работы, а также от характеристик и длительности радиационного воздействия. Для примесных фотоприемников существенным дополнительным является влияние на кинетику инициированного радиацией фактором долговременного фотоотклика процессов образования радиационных дефектов в кремнии. Поэтому большое значение приобретает развитие специальных методов исследования и аппаратуры для изучения воздействия радиации на примесную фотопроводимость и прыжковую проводимость по примесной зоне в монокристаллическом кремнии, полученном методом зонной плавки, в том числе с применением физико-математического моделирования, позволяющего результаты испытаний приборов, полученные для одних условий испытаний. применить лля оценки надежности работы этих приборов в других эксплуатационных условиях. Это особо важно при экстраполяции результатов наземных радиационных испытаний ускоренных полупроводниковых приборов, полученных при мощностях дозы до 10<sup>6</sup> раз превышающих реальные, на натурные условия низкоинтенсивного облучения в космическом пространстве (мощность дозы порядка 0.001 рад/с и менее).

К началу настоящей работы в ряде ведущих лабораторий мира был достигнут значительный прогресс в исследовании радиационного отклика МОП-транзисторов различных технологий на импульсное радиационное воздействие (Naval Research Laboratory, USA; Harry Diamond Laboratories, USA), а также в построении упрощенных полуэмпирических моделей расчета радиационного отклика на основе теории линейных систем (Sandia National Laboratory, USA; Naval Research Laboratory, USA). Однако целый ряд наблюдаемых в условиях ускоренных испытаний радиационных эффектов таких как эффект "радиационно-индуцированной нейтрализации заряда", эффект "полевого коллапса", характерных для работы МОП-транзисторов в цифровых схемах и существенным образом влияющих на надежность их работы, не могут быть описаны в рамках теории линейных систем. В связи с этим стала актуальной задача разработки метода компьютерного моделирования нелинейного радиационного отклика МОП-транзистора, базирующегося на теории линейных систем и вместе с тем учитывающего основные нелинейные радиационные эффекты в МОП-системах.

**Целью** данной работы является исследование инициированных ионизирующей радиацией долговременных процессов в глубокоохлаждаемых фоторезисторных кремниевых (p<sup>+</sup>- p -p<sup>+</sup>) - структурах и МОП-транзисторах и построение физико-математических моделей этих процессов, пригодных для идентификации параметров моделей по результатам ускоренных лабораторных испытаний и для прогнозирования долговременного поведения полупроводниковых структур в изменяющихся электрических режимах работы.

Для достижения поставленной цели решались следующие исследовательские задачи:

1. Разработка специальной криогенной аппаратуры для радиационных исследований комбинированного действия высокоэнергетического электронного и светового излучений.

2. Экспериментальное исследование в области температур 8÷12 К основных закономерностей долговременных процессов индуцированной примесной проводимости и фотопроводимости в облучаемом электронами примесном кремнии с малой степенью компенсации.

3. Разработка модели возбуждения и долговременной релаксации индуцированной примесной фотопроводимости в слабо компенсированном примесном кремнии.

4. Разработка физико-математической модели изотермической релаксации индуцированной прыжковой проводимости по состояниям вблизи уровня Ферми в Si<B> с малой степенью компенсации и методики идентификации ее параметров.

5. Разработка метода компьютерного моделирования долговременного нелинейного отклика п-канального МОП-транзистора на радиационное воздействие с учетом изменяющегося электрического режима работы в процессе облучения и отжига.

Работа проводилась в период с 1986 года по 2001 год и велась в рамках ряда Всесоюзных НИР и хоздоговорных работ с ФГУП НПЦ "НПО ОРИОН " и ФГУП "НПО ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ", а также в рамках научных программ:

- Программа фундаментальных исследований АН СССР по проблеме 1.3 Физика твердого тела на 1989-1995 годы, тема 1.3.10.7.

Инновационная НТП Минвуза РФ,

- НТП Минвуза РФ "Университеты России" и "ФИЗМАТ",

 Программа Минвуза РФ "Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники".

Научная новизна работы отражена в заключении и в сформулированных ниже основных защищаемых положениях.

#### Автор защищает:

1. Комплекс радиационно-криогенной аппаратуры для низкотемпературных радиационных исследований комбинированного действия светового и электронного излучений на примесную фотопроводимость в полупроводниках, которая реализует импульсный метод исследования кинетики возбуждения индуцированной примесной фотопроводимости, обеспечивает тепловое фоновое излучение ниже 10<sup>12</sup> фотон·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> и предоставляет возможность программного управления спектральными характеристиками электронного излучения.

2. Нелинейную модель возбуждения индуцированной примесной фотопроводимости в Si<B> с концентрацией бора не более 5·10<sup>15</sup> см<sup>-3</sup> и малой степенью компенсации, учитывающую захват и изменение подвижности основных и неосновных носителей заряда и, в отличии от известных моделей, адекватно описывающую процесс возбуждения индуцированной примесной фотопроводимости при высоком уровне возбуждения.

3. Методику исследований и модель релаксации индуцированной примесной фотопроводимости в слабо компенсированном Si<B>, учитывающую процесс перезарядки примесей и дефектов и, в отличие от известных моделей, пригодные для анализа изменений индуцированной примесной фотопроводимости из-за образования радиационных дефектов.

4. Новый способ определения параметров примесного полупроводника с малой степенью компенсации на основе измерения изотермической релаксации к равновесным условиям индуцированной прыжковой проводимости по состояниям вблизи уровня Ферми.

5. Метод суммы вариативных сверток, позволяющий определять долговременный нелинейный отклик порогового напряжения МОП-транзистора на радиационное воздействие как решение самосогласованной задачи в виде суммы последовательно сдвинутых во времени вариативных сверток с кусочно-постоянными начальными условиями, и который учитывает технологию изготовления транзистора, параметры радиационного воздействия и изменения электрического режима работы.

6. Радиационную модель МОП-транзистора и алгоритм метода вариативных сверток, позволяющие идентифицировать параметры модели на основе экспериментальных данных, полученных для составляющих сдвига порогового напряжения, обусловленных соответственно объемным зарядом захваченных в подзатворном окисле дырок и зарядом поверхностных состояний на границе раздела окисел-кремний, в процессе ускоренных испытаний и последующего изотермического отжига с переключением электрического режима в процессе облучения и отжига.

### Практическая значимость

1. Результаты радиационных исследований свойств монокристаллического примесного кремния с малой степенью компенсации, а также созданный комплекс радиационно-криогенной аппаратуры на базе транспортного гелиевого сосуда СТГ-40 для имитационных исследований индуцированной примесной проводимости в примесных полупроводниках использованы в разработках ФГУП "НПО ОРИОН".

2. Разработанный метод изотермической релаксации индуцированной прыжковой проводимости использован для определения радиационных изменений параметров легированного кремния с малой степенью компенсации. 3.Результаты исследований радиационной стойкости входных транзисторов КМОП интегральных схем с моделированием спектрально-угловых характеристик электронного излучения использованы в разработках космических аппаратов навигации связи и телевидения производства НПО Прикладной механики.

4. Разработанный метод суммы вариативных сверток применим для расчета нелинейных эффектов радиационного отклика МОП транзисторов радиационностойких технологий, а также для прогнозирования скорости их радиационной деградации в условиях космического пространства по результатам ускоренных радиационных испытаний.

Апробация работы и публикации. Основные результаты, полученные автором, опубликованы в 53 печатных работах, включая 4 изобретения и патент. Материалы, изложенные в диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных совещаниях и конференциях:

"1 Всесоюзная научно-техническая конференция Радиационная стойкость бортовой аппаратуры и элементов космических аппаратов" 25-27 июня 1991 г., Томск; Международная конференция "Проблемы взаимодействия ИСЗ с космической средой." 15-19 июня 1992 г. Новосибирск; "8-я конференция по радиационной физике и химии неорганических материалов" - Томск, 1993; "30-е совещание по физике низких температур", 6-7 сентября 1994 г., г.Дубна (Московская обл.) ОИЯИ; "Взаимодействие космических аппаратов с окружающей средой." Российская конференция. Иркутск, 1-3 ноября 1995г.; "Радиационные гетерогенные процессы: шестая международная конференция" КГУ,г.Кемерово,1995 г.; IV Всероссийской конференции по модификации структуры материалов пучками заряженных частиц. 23-25 мая 1996 г. Томск, ТПУ, 1996; III Межотраслевая научно-техническая конференция "Влияние низкоинтенсивных излучений космического пространства и атомных электростанций на элементы и устройства радиоэлектроники и электротехники" (3-5 июня 1997 года, НИИ приборов, г.Лыткарино, Московская обл.); "Ш Российской конференции по физике полупроводников", Физический институт г.Москва (декабрь 1997 г.); Всероссийская научно-техническая AH . конференция по радиационной стойкости электронных систем "Стойкость-98" (2-4 июня 1998 года, НИИ приборов, г.Лыткарино, Московская обл.); "The 7<sup>th</sup> European Conference on Non-Destructive Testing, Copenhagen, 26-29 May 1998",

6

Denmark, 1998; 10-я международной конференции по радиационной физике и химии неорганических материалов (РФХ-10),21-25 сентября 1999 г.", г. Томск; «1<sup>st</sup> International Congress on Radiation Physics, High Current Electronics, and Modification of Materials. Proceedings. 11<sup>th</sup> International Conference on Radiation Physics and Chemistry of Condensed Matter.», Tomsk, 2000

### Содержание работы

Во введении обсуждена актуальность, научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы ее основная цель и задачи.

В первой главе представлен общий анализ процессов долговременного отклика, обусловленных ионизационными эффектами захвата неравновесных носителей заряда, и рассмотрены характерные особенности объекта исследований

В разделе 1.1 на примере различных полупроводниковых структур описаны долговременные процессы (в том числе исследованные автором настоящей работы), которые обусловлены захватом неравновесных носителей заряда на границе раздела полупроводника с газовой средой (или диэлектриком), на ловушки в объеме полупроводника или в изолирующем слое окисла в области прилегающей к границе раздела окисел-полупроводник.

В разделе 1.2 на примере примесного монокристаллического кремния, легированного бором, отмечены следующие особенности примесного кремния:

- аномально высокая эффективность образования радиационных дефектов на основе легирующей примеси при низкотемпературном облучении электронами и гамма-квантами (эффект Уоткинса);
- увеличение скорости радиационного дефектообразования под действием межзонного светового возбуждения полупроводника;
- перезарядка примесей и перестройка системы дефектов под действием светового излучения, обеспечивающего межзонное возбуждение кремния;
- несколько механизмов рекомбинации основных носителей заряда в зависимости от степени легирования и степени компенсации кремния, уровня оптического возбуждения, электрического поля смещения и температуры.

В числе возможных механизмов рекомбинации основных носителей заряда рассмотрены прямой (каскадный) захват на притягивающие центры, захват на комплексы ( $A^-$ -  $A^+$ ) в полупроводнике р-типа, непрямая рекомбинация на притягивающих центрах за счет захвата в  $A^+$ -состояния с последующими прыжковым (по нейтральным центрам) или дрейфовым (по  $A^+$ -зоне) стеканием носителя на притягивающие центры. Для прыжковой проводимости отмечено, что она сопровождается специфической межпримесной рекомбинацией, когда неравновесный электрон, находящийся на доноре, непосредственно, без выброса в свободную зону, рекомбинирует с дыркой, находящейся на акцепторе.

С учетом различий в преобладающем механизме электропроводности далее в работе раздельно рассматриваются долговременные процессы инициированные электронами с энергией до 6 МэВ в слабо компенсированном кремнии, легированном бором (Si<B>), при концентрации бора 5.10<sup>15</sup> см<sup>-3</sup> и ниже, когда преобладает примесная проводимость, и в слабо компенсированном кремнии при концентрации бора в диапазоне  $2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup> ÷  $1 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>, когда преобладает прыжковая проводимость по состояниям вблизи уровня Ферми.

Анализ классической теории индуцированной примесной фотопроводимости в легированном кремнии, обусловленной захватом неравновесных несновных носителей заряда на мелкие дефекты при комнатной температуре (J.A. Hornbeck, J.R. Haynes, 1955), показывает, что она неприменима для низкотемпературной примесной фотопроводимости в кремнии, поскольку не учитывает захват избыточных основных носителей заряда и возможных изменений скорости рекомбинации в процессе перезарядки примесей. Поэтому необходима разработка модели индуцированной фотопроводимости, учитывающей нейтрализацию примесей и возможное изменение рекомбинационных процессов.

К началу настоящей работы радиационные низкотемпературные исследования индуцированной примесной фотопроводимости при низком тепловом фоне в слабо компенсированном монокристаллическом кремнии, полученном методом зонной плавки, были проведены лишь для области сверхмалых доз ≈10 рад (Petroff M.D. et al., 1979). Влияние на индуцированную фотопроводимость средних и больших доз радиации оставалось неисследованным.

В разделе 1.3 на основе анализа стационарных и релаксационных методов измерений примесей и дефектов в полупроводниках высказано предположение, что если измерения проводимости полупроводника, проводимые в неравновесных условиях позволяют определять только фотоэлектрические параметры (такие как концентрация и энергия ионизации центров захвата, а также сечения захвата и рекомбинации носителей заряда), то метод, основанный на измерении квазиравновесной релаксации индуцированной проводимости, потенциально позволяет определить также степень компенсации полупроводника.

В разделе 1.4 рассмотрены основные закономерности долговременных процессов в МОП-транзисторах и микросхемах на их основе, обусловленные захватом дырок в окисле и образованием поверхностных состояний на границе раздела окисел-полупроводник, а также возможность компьютерного моделирования этих процессов на основе теории линейных систем с экстраполяцией на условия космического пространства. На примере исследований выполненных в Sandia National Laboratory, продемонстрирована применимость теории линейных систем для описания радиационного отклика КМОП интегральных схем, изготовленных в этой лаборатории, для условий статического электрического смещения при дозе облучения до 100 крад (SiO<sub>2</sub>) и мощности дозы в диапазоне от  $6 \cdot 10^9$  рад/с до 0,05 рад/с. Исследования для микросхем отечественного производства, проведенные с участием автора настоящей работы, подтвердили применимость теории линейных систем для описания радиационного отклика при дозе 60 крад (Si) в изученном диапазоне мощности дозы от 500 до 0,5 рад/с при облучении на гамма-установке Со-60 и импульсном электронном пучке линейного ускорителя ЭЛУ-4.

Оценка долговременного радиационного отклика методом теории линейных систем сводится к вычислению интеграла свертки с импульсной переходной (весовой) функцией радиационного отклика на импульсное воздействие. На практике получили развитие упрощенные физические модели определения весовой функции отклика (Naval Research Laboratory, Boeing Electronic Company (1989), Harry Diamond Laboratories (1988)), в которых расчетная модель имеет ряд особенностей:

- пренебрегается вкладом в изменение параметров МОП-транзистора объемного заряда движущихся по мелким ловушкам дырок,
- полевая зависимость процесса рекомбинации электронно-дырочных пар и конечного выхода свободных дырок в область расположения глубоких ловушек определяется на основе эмпирических соотношений, обобщающих экспериментальные результаты радиационных исследований емкостных структур,
- зависимость во времени весовой функции процесса образования поверхностных состояний на границе раздела Si/SiO<sub>2</sub> также определяется эмпирическим соотношением, параметры которого зависят от температуры и технологии изготовления МОП-транзистора.

Вместе с тем, существенная нелинейность радиационного отклика МОПтранзистора обнаруженная при укоренных испытаниях в условиях переключения напряжения на его затворе, включая эффекты "радиационноиндуцированной нейтрализации заряда" и "полевого коллапса", вызвали необходимость создания новой упрощенной нелинейной модели радиационного отклика, базирующейся на достижениях теории линейных систем.

В разделе 1.5 проанализированы общие свойства долговременных процессов, обусловленных захватом компонентов электронно-дырочных пар. Предлагается два подхода для обобщенной физико-математической модели предмета исследований:

1. Долговременный процесс это свойство замкнутой термодинамической системы доноров и акцепторов, находящейся в квазиравновесном состоянии как бесконечной временной последовательности равновесных состояний после выключения ионизирующего воздействия или комбинированного межзонного и примесного светового возбуждения.

2. Нелинейный процесс долговременной релаксации это реакция нелинейной системы с конечной памятью на существенное изменение ее внутренних параметров, так что состояние такой нелинейной системы в любой момент времени в процессе внешнего воздействии или последующей релаксации может быть корректно определено только с учетом состояний системы во все предыдущие моменты времени.

В случае первого подхода теория процесса долговременной релаксации индуцированной проводимости может быть построена на основе классической теории замкнутой равновесной термодинамической системы. При втором

подходе при реализации компьютерного алгоритма отклика нелинейной системы с конечной памятью можно в максимальной степени использовать линейные физико-математические модели, которые на протяжении многих десятилетий создавались для описания процессов, инициированных в МОП-системе радиацией.

**Во второй главе** представлено описание разработанных методик и криогенной аппаратуры для радиационных исследований ИПФ в Si<B>, а также метод лабораторного моделирования энергетического спектра электронов.

Для исследования ИПФ выбрана методика импульсного межзонного возбуждения. При импульсном возбуждении источник излучения генерирующего электронно-дырочные пары работает в периодическом импульсном режиме, так что в промежутках между импульсами проводимость образца из-за протекания процесса рекомбинации определяется примесной проводимостью. Поэтому методика импульсного возбуждения дает возможность непосредственного измерения долговременной компоненты примесной фотопроводимости, то есть возможность непосредственного измерения ИПФ. Для реализации такой методики необходим управляемый источник собственного возбуждения, обеспечивающий равномерную генерацию электронно-дырочных пар по объему исследуемого полупроводникового материала. В качестве такого источника выбраны светоизлучающий диод, излучающий свет с длиной волны вблизи края собственного поглощения или импульсный ускоритель электронов.

Известные разработки криогенной радиационной аппаратуры для исследований примесной фотопроводимости, обеспечивающие низкий (<10<sup>12</sup> фотон/см<sup>2</sup>) тепловой фон предназначены для воздействия гамма-излучением и не дают возможности существенно изменять спектральный состав излучения (исследовать энергетическую зависимость радиационного дефектообразования при комбинированном действии светового излучения и радиации В разделе 2.2 обоснованы требования к разрабатываемой аппаратуре по диапазону энергии электронного и светового излучений, диапазону измеряемых токов, диапазону температур и времени непрерывного функционирования. В соответствии с поставленной задачей фотоэлектрические параметры кремния должны определяться как функция температуры, времени и интенсивности примесного возбуждения, а также как функция дозы, мощности дозы и времени электронного облучения.

Исходя из этих требований, разработанная экспериментальная аппаратура содержит:

- специальный гелиевый криостат содержащий полупроводниковые источники света для исследования примесной фотопроводимости в условиях низкого теплового фона и воздействия электронами с энергией до 6 МэВ, - источник электронного излучения
- - бетатрон МИБ-6э с выводом и фокусировкой электронного пучка,

 автоматизированный измерительный комплекс для измерения фотоэлектрических параметров исследуемых образцов примесного кремния под управлением ЭВМ.

Общий вид криогенной аппаратуры в комплексе с источником электронного излучения - бетатроном представлен на рис.1. При совместной работе гелиевый криостат и бетатрон располагаются в специальном железобетонном бункере и соединяются кабелями длиной 12 метров с пультом бетатрона и автоматизированным измерительным комплексом, расположенными в смежном



Рис. 1 Общий вид гелиевого криостата с источником электронного излучения - бетатооном на энергию электронов до 6 МэВ.

помещении. Состав аппаратуры обеспечивает: сбор и накопление экспериментальных данных, содержащего набор первичную обработку поступающей информации в реальном времени, оперативный вывод контрольной информации о ходе эксперимента и управление ходом эксперимента, стабилизацию основных параметров режима измерений.

Это достигается введением в состав аппаратуры ЭВМ и блока накопления и обработки данных, который содержит в своем составе ОЗУ, два таймера, набор ЦАП, АЦП, цифровой выход для управления измерительными приборами и связан с ЭВМ через параллельные порты. Управление экспериментом (измерение фототока через заданные временные интервалы, установка уровня световой подсветки, включение и выключение светоизлучающих диодов, контроль температуры) осуществляется через команды оператора и специальное программное обеспечение, которое представляет собой набор программ реализующих методики измерений через специально разработанные алгоритмы.

Основным элементом аппаратуры является вакуумный криостат погружного типа, в котором необходимый температурный режим поддерживается за счет теплообменников, погруженных в жидкий гелий, а регулировка температуры держателя образцов осуществляется нагревателем. Для обеспечения возможности облучения исследуемых образцов кремния высокоэнергетическими электронами при низком тепловом фоне, размещение исследуемых образцов производится в замкнутой полости массивного охлажденного до температуры образца медного держателя, причем ввол электронного пучка излучения в полость держателя осуществляется через окно, перекрытое охлаждаемой медной фольгой. С целью уменьшения тепловой нагрузки на держатель образцов со стороны внешней среды криостат снабжён тепловыми поддерживаемыми дополнительными экранами, при промежуточном уровне температур. Температура одного экрана определяется жидким азотом, а температура другого экрана близка к 40 К. Таким образом, особенностью криостата является возможность исследования главной релаксации индуцированной фотопроводимости в облучаемом электронами кремнии в состояние термодинамического равновесия, что обеспечивается равновесным фоном теплового излучения в полости держателя.

Экспериментально установленные характеристики криостата: - полное время охлаждения образцов от комнатной температуры до температуры 8 К составляет 1 час, а до температуры 6 К - 2 часа, - минимальное время автономного функционирования криостата в заданном режиме при использовании гелиевого сосуда СТГ-40 составляет 30 часов, - минимальная устойчивая температура держателя образцов - 5,95 К при расходе жидкого гелия 0,1 дм<sup>3</sup>-час<sup>-1</sup>.

Использованный в аппаратуре малогабаритный импульсный бетатрон МИБ-6э на энергию электронов 6 МэВ, снабжен системой транспортировки и фокусировки пучка электронов и обеспечивает максимальная мощность дозы в воздухе на выходе из электронопровода до 30 крад/мин. Регулировка временной задержки подачи тока в обмотку смещения обеспечивает изменение энергии ускоренных электронов в диапазоне от 2 МэВ до 6 МэВ при частоте следования импульсов излучения 100 Гц. Ток пучка электронов на входе в контролируется проходной ионизационной камерой, показания криостат которой калиброваны по стандартному дозиметру VA-J-18. Мощность дозы излучения в исследуемом образце кремния внутри криостата дополнительно контролировалась по величине тока, протекающего через образец в процессе облучения. Полученное таким путем значение мощности дозы в пределах 15 % согласовалось со значением мощности дозы, которое определялось расчетом методом Монте-Карло коэффициента пересчета показаний ионизационного тока проходной ионизационной камеры в ионизационный ток расположенного в криостате образца примесного кремния. Расчет методом Монте-Карло проводился с учетом реальной геометрии криостата и химического состава его конструкционных материалов.

В качестве источника примесного возбуждения использован работающий при температуре до 4,2 К светоизлучающий диод на основе гетероперехода в системе  $In_{1-x}Ga_xAs - InAsB$ . В нормальных условиях работы этот диод имеет следующие характеристики: длина волны излучения -3-4 мкм при ширине спектра излучения 0,3-0,6 мкм (при температуре жидкого гелия длина волны смещается на 0,8 мкм в коротковолновую область), мощность излучения - do 20 мкВт при быстродействии до 1 мкс (при температуре жидкого гелия мощность излучения возрастает примерно на порядок величины).

На основе свойства линейности выхода светового излучения светоизлучающего диода необходимый уровень примесной подсветки устанавливался путем регулировки входного напряжения генератора тока, нагрузкой является светоизлучающий диод. которого Создание модулированного примесного излучения на частоте до 70 Гц обеспечивалось включением в цепь питания светодиода генератора синусоидального напряжения с трансформаторным выходом. При радиационных исследованиях с использованием электронов с энергией до 6 МэВ светоизлучающий диод размещался в специальном канале в теле держателя образцов и был защищен от рассеянного электронного излучения сапфировым световодом толщиной 5 мм. Разработанная аппаратура обеспечивает:

- рабочий диапазон температур исследуемых образцов 6÷20 К с поддержанием температуры с погрешностью 0.05 К;

- воздействие электронами при энергии до 6 МэВ с плотностью потока до  $5 \cdot 10^8$  см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>, близкой к максимальным значениям в радиационных поясах Земли;

- низкий тепловой фон (поток фотонов теплового фона менее  $10^{12} \, \text{cm}^{-2} \, \text{c}^{-1}$ ),

- импульсное и непрерывное воздействие оптическими излучениями ИКдиапазона, обеспечивающими примесную и собственную фотопроводимость в исследуемых образцах кремния;

-автоматизированное дистанционное измерение фототоков в диапазоне от  $10^{-12}$  до  $10^{-8}$  A, а также температуры и параметров электронного излучения;

- длительное (до полутора суток) автономное функционирование аппаратуры в заданном режиме криостатирования при рассеиваемой мощности в образце до 100 мкВт.

Методом Монте-Карло с учетом реальной геометрии криостата и его конструкционных материалов выполнена оценка спектра электронного излучения в исследуемом образце примесного кремния, размещенного в полости держателя образцов криостата.

Для исследований проводимых в НПО " ОРИОН" была разработана специальная полуавтоматизированная криогенная аппаратура (Рис.2), которая обеспечивает исследования примесных фотоприемников глубокого охлаждения в условиях имитации световым излучением действия малых доз электронного излучения. При разработке этой аппаратуры была использована экспериментально установленная эквивалентность действия на примесную фотопроводимость малых доз электронного излучения и светового излучения с длиной волны вблизи края фундаментального поглощения.



Рис. 2 Полуавтоматизированная криогенная аппаратура для имитационных радиационных исследований примесной фотопроводимости.

Основные параметры специальной криогенной аппаратуры и ее возможности близки к представленным выше.

В разделе 2.3 изложена разработанная методика моделирования спектральной плотности высокоэнергетической части спектральной плотности высокоэнергетической электронной компоненты ЕРПЗ (в том числе за конструкционной защитой КА). Особое внимание уделено лабораторному электронных полей на малогабаритном бетатроне с моделированию максимальной энергией электронов до 6 МэВ. Бетатрон обеспечивает уникальную возможность независимого управления энергией и интенсивностью электронного излучения в каждом импульсе излучения по заданной программе. Он может работать круглосуточно под управлением микропроцессора, обеспечивая требуемые вариации энергетического спектра и плотности потока электронов. Задача моделирования сводится к правильному выбору алгоритма управления энергией ускоренных электронов в каждом импульсе излучения бетатрона и выбору параметров поглотителя-рассеивателя, обеспечивающего необходимые спектрально-угловые характеристики электронов в поле облучения. Необходимые размеры поля облучения могут быть достигнуты или на основе известного метода рассеивающих фольг или за счет магнитной развертки электронного пучка, выведенного из ускорителя. Поддержание условий, обеспечивающих заданные спектрально-угловые характеристики поля излучения, достигается на основе применения системы контрольно-измерительных устройств, контролирующих параметры пучка ускоренных электронов и работу ускорителя электронов.

Исходными данными для моделирования спектра электронов в элементах бортовой аппаратуры являются: характеристики натурной радиационной обстановки; конструктивные особенности бортовой аппаратуры (БА) КА, обеспечивающие его радиационную защиту; конструктивные модели элементов БА, учитывающие структуру, геометрические размеры, а также плотность и химический состав. В процессе моделирования, исходя из типа орбиты КА, определяются характеристики натурных полей электронного излучения и их изменение во времени (при моделировании усредненных радиационных условий эти характеристики могут быть представлены в виде не зависящих от времени Далее на основании конструкторскоматематических выражений). технологической документации строится расчетная модель элемента БА для проведения на ней расчетов методом Монте-Карло. После этого численным моделированием переноса излучения рассчитываются спектрально-угловые характеристики излучения и мощность дозы в элементе БА или в радиационночувствительном объеме этого элемента в натурных условиях (Рис.3). Затем на основе экспериментально определенных характеристик электронного пучка ускорителя и их зависимости от режима работы ускорителя методом численного моделирования рассчитываются характеристики устройства формирования поля излучения (конвертера или рассеивателя), обеспечивающие требуемое спектрально-угловое распределение электронов в облучаемом элементе БА и



Рис.3 Геометрия расчета потоковых спектров электронов в микросхемах в натурных условиях: 1 - экранно-вакуумная изоляция: 2 - стенка гермоконтейнера; 3 - азот; 4 стенка воздуховода; 5 - корпус микросхемы; 6 - кристалл кремния.



Рис.4 Спектр электронов бетатрона за Alбарьером толщиной 4.2 мм (гистограмма). Сплошная кривая - моделируемый натурный спектр в кремниевом элементе (для орбиты с  $C_2=0,415$  MэB).

определяется необходимый режим работы ускорителя. В заключение проводится тестовый эксперимент для подтверждения правильности работы программы расчета, выбора параметров устройства формирования и режима работы ускорителя электронов.

Практическое моделирование спектра электронов, на основе предварительно сделанных расчетов методом Монте-Карло, было осуществлено за мишенью из алюминия толщиной 4.2 мм на малогабаритном импульсном бетатроне МИБ-6Э с выводом пучка. Программное управление бетатроном обеспечивало вывод электронов с фиксированными энергиями: 2.6, 2.8, 3.0, 3.2, 3.4, 3.8, 4.0, 4.2 МэВ. Различие в интенсивности частиц разной энергии на выходе из камеры бетатрона составляет не более 10-15 %. Результат моделирования параметров спектра электронов бетатрона за алюминиевым рассеивателем приведен на рис.4 в сравнении с распределением натурного спектра на борту КА. Полное время переключения 11 каналов энергии за один цикл интегрально формируемого спектрально-углового распределения электронов составило около 6с.

**В третьей главе** представлены результаты радиационных исследований ИПФ при воздействии электронами с энергией 6 МэВ, а также результаты моделирования ИПФ для процессов ее возбуждения и релаксации.

В подразделе 3.1 описаны результаты исследования действия малых доз электронного излучения с энергией 6 МэВ на ИПФ в Si<B> при температуре 8÷11 К в образцах р-типа кремния, легированного бором до концентрации  $N_B = 10^{15} \div 5 \cdot 10^{-15}$  см<sup>-3</sup> при степени компенсации  $\approx 10^{-3}$ . Измерялись фототок и ток проводимости, протекающие через исследуемый образец кремния, в зависимости от времени и факторов внешних условий: мощности дозы и дозы электронного излучения, интенсивности примесной подсветки, электрического поля и температуры. Измерения проводились в активном электрическом режиме при средней мощности дозы 1-÷30 рад/мин, то

есть при средней плотности потока электронов  $(3,4\cdot10^5 \div 1,6\cdot10^7)$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>. Длительность однократного воздействия электронным излучением определялась временем перехода фототока или проводимости в состояние близкое к насыщению и варьировалась в пределах  $(0,5\cdot10)$  минуты так, что интегральный поток электронов при однократном облучении составлял  $10^7 \div 10^9$  см<sup>-2</sup>. Использовались два режима примесной подсветки ( $\lambda \approx 3$  мкм): фототок примесной подсветки мал по сравнению с темновым током, определяемым фоном, и фототок примесной подсветки существенно превосходит темновой ток. При изменении проводимости исследуемого образца на нем автоматически поддерживалось неизменное напряжение смещения. В первом случае измерения велись частотно-селективным методом на частоте модуляции светового потока 70 Гц, а во втором случае измерении велись в условиях стационарной примесной подсветки и при измерении велись в условиях стационарной примесной подсветки и при измерении велись в условиях стационарной примесной подсветки и при измерения велись в условиях стационарной примесной подсветки и при измерении тока через образец электрометрическим усилителем.

Образцы исследуемого монокристаллического кремния представляли собой ( $p^+$ - p -  $p^+$ )-структуры и имели размеры (2 x 1,8 x 2,5) мм <sup>3</sup> при расстоянии между омическими контактами 2,5 мм, а также размеры (1,9 x 2,0 x 3,9) мм <sup>3</sup> при расстоянии между омическими контактами 2,0 мм.

На первоначальном этапе эксперимента была установлена идентичность действия малых доз электронного излучения и светового излучения на длине волны ≈1,054 мкм, которые приводят к межзонному возбуждению кремния и возбуждают долговременные изменения примесной проводимости и примесной фотопроводимости кремния. В том и в другом случае генерация электроннодырочных пар в кремнии приводит к возрастанию тока примесной фотопроводимости и последующей его долговременной (более часа) релаксации к первоначальному значению. Гашение этой неравновесной фотопроводимости при нагревах до температуры выше 20 К и появление в процессе нагрева пика термостимулированной проводимости позволили идентифицировать наблюдаемое явление как ИПФ. Показано, что для предотвращения существенного влияния радиационного дефектообразования на изучаемое явление методически целесообразно исследовать основные свойств ИПФ в условиях замены электронного излучения световым излучением, обеспечивающем эквивалентную объемную скорость генерации электроннодырочных пар в кремнии. В дальнейшем основные свойства ИПФ в кремнии, легированном бором, исследованы при комбинированном действии светового межзонного и светового примесного излучений, а электронное излучение использовалось только для изучения влияния образования радиационных дефектов на ИПФ.

В этом же разделе 3.1 приведены результаты исследования основных свойств ИПФ при воздействии таких факторов как интенсивность и длительность собственного возбуждения, температуры и электрического поля смещения.

Предложена методика изучения свойств ИПФ, базирующаяся на многократном повторении цикла: измерение тока примесной фотопроводимости при рабочей температуре образца кремния, возбуждение ИПФ при неизменных внешних условиях (температура, электрическое поле, интенсивность световых воздействий), измерение кинетики возбуждения и релаксации ИПФ, кратковременный нагрев образца до температуры 25 К с последующим охлаждением до рабочей температуры, выдержка при рабочей температуре и контрольное измерение тока примесной фотопроводимости при рабочей Типичное относительное изменение тока температуре. примесной фотопроводимости во времени в таком цикле для случая, когда фотопроводимость существенно превосходит темновую проводимость и применено импульсное возбуждение ИПФ межзонной подсветкой на частоте 0,5 Гц, представлено на рис.5. Такая методика позволяет отделить возникающую релаксирующую межзонном возбуждении быстро биполярную при от монополярной примесной фотопроводимости, которая проводимость медленно изменяется на стадиях возбуждения и релаксации ИПФ и позволяет контролировать степень опустошения центров захвата при рабочей температуре. При этом эффект ИПФ целесообразно характеризовать отношением  $J = I/I_0$  тока примесной фотопроводимости I в условиях захвата неравновесных носителей заряда к току примесной фотопроводимости I<sub>0</sub> в условиях опустошения уровней захвата. Наблюдаемый в процессе быстрого нагрева облученного образца пик термостимулированной проводимости соответствует остаточной величине ИПФ, и позволяет определить энергию и концентрацию уровней захвата неравновесных носителей заряда.



Рис.5 Осциллограмма цикла импульсного возбуждения и последующей релаксации ИПФ при T=10,35 K в образце Si<B> с  $N_{\rm B}$ =5·10<sup>15</sup> см<sup>-3</sup>. Обозначения: 1 – импульсное возбуждение на частоте f=0,2 Гц, 2- релаксация, 3 – пик термостимулированного тока при нагреве до T=25 K (участок 4), 5 - охлаждение образца до рабочей температуры.

Исследование температурной зависимости процесса возбуждения ИПФ показало, что при температурах выше 12 К появляется индуцированная (остаточная) примесная проводимость, которая существует в отсутствии примесной подсветки после биполярного возбуждения электронным излучением или светом. Кроме того, повышение температуры приводит к уменьшению скорости релаксации ИПФ вероятно за счет увеличения скорости фототермической ионизации уровней захвата неосновных носителей заряда.

Обнаружено, что эффект ИПФ немонотонно зависит от величины электрического поля в примесном кремнии. Оказалось, что при фиксированной температуре величина Ј в стадии насыщения ИПФ характеризуется минимумом, который находится при напряженности поля около 40 В/см. Причем при напряженности поля ≈10 В/см величина эффекта ИПФ Ј резко возрастает достигает значения 10 и более, в то время как при увеличении напряженности поля до величины 80 В/см рост величины эффекта ИПФ не превышает 25 %. Наблюдаемая немонотонная зависимость объяснена влиянием электрического поля на процесс разделения электронно-дырочных пар, процесс захвата свободных носителей заряда на ловушки и на процесс ударной ионизации центров захвата. Влияние поля на два последних процесса обуславливает наблюдаемую полевую зависимость релаксации ИПФ. Кроме того, с увеличением напряженности электрического поля в кремнии наблюдается монотонное увеличение скорости долговременной релаксации ИФП. При подаче на образец кремния микросекундного импульса напряжения, обеспечивающего напряженность электрического поля порядка 200 В/см и более, за время действия этого импульса наблюдается полевое гашение ИПФ за счет ударной ионизации большей части центров захвата электронов. Дальнейшие исследования показали однако, что подача импульсного смещения величиной выше порога примесного пробоя не обеспечивает полной ионизации компенсирующих примесей, как это имеет место при нагреве образца выше температуры ионизации примеси. Поэтому для восстановления исходного зарядового состояния примесей и дефектов использовался метод термического опустошения путем нагрева образцов до температуры Т=25 К или выше. Все дальнейшие исследования ИПФ выполнены при напряженности поля 40÷50 В/см, для которой уже при малой мощности межзонного возбуждения достигается насыщение ИПФ и последующая релаксация практически не зависит от уровня возбуждения.

Раздел 3.2 содержит теоретическое и экспериментальное обоснование предлагаемой модели ИПФ в слабо компенсированном Si<B>. Эта модель основана на системе уравнений, которая включает в себя кинетические уравнения для переходов электронов между зоной проводимости и уровнем компенсирующей примеси, уравнение примесной фотопроводимости для одноуровневой примеси (бор) и уравнение электрической нейтральности. Предполагается, что концентрация дырок захваченных нейтральными атомами бора мала по сравнению с концентрацией компенсирующих примесей и дефектов, что все примеси и дефекты однозарядны и реализуется условие

многократного захвата неосновных носителей заряда (электронов) заряженными примесными атомами или дефектами компенсирующего типа. В этом случае можно считать, что процесс релаксации ИПФ в промежутках между импульсами и возбуждения и процесс релаксации после полного выключения межзонного возбуждения протекают в условиях квазиравновесности. При этом полупроводник можно характеризовать зависящей от времени эффективной степенью компенсации  $k_{eg}$ =k-m/N<sub>A</sub>, где m – концентрация захваченных электронов (неосновных носителей заряда), k - степень компенсации и  $N_A$  – концентрация легирующей примеси. Концентрация захваченных электронов m определяется кинетическими уравнениями:

$$\frac{dn}{dt} = G + \alpha_e m - \beta_e n(N_D - m) + \gamma m \frac{n}{\tau} - \frac{n}{\tau};$$

$$\frac{dm}{dt} = -\alpha_e m + \beta_e n(N_D - m) - \gamma m \frac{n}{\tau},$$
(1)

где  $G [cm^{-3}c^{-1}]$  – скорость генерации электронно-дырочных пар, *n* –концентрация электронов в зоне проводимости,  $N_{\rm D}$  - концентрация компенсирующей примеси, α<sub>е</sub> – коэффициент ионизации донорной примеси с выбросом электрона в зону проводимости из-за действия различных факторов (температура, фоновое излучение за исключением рекомбинационного, ударная ионизация),  $\beta_e$  – коэффициент захвата электронов, т - характерное время электронно-дырочной рекомбинации через какой-либо механизм, у - коэффициент темпа ионизации атомов компенсирующей примеси (центров захвата) рекомбинационным излучением или через какой либо иной механизм, связанный с процессом электронно-дырочной рекомбинации. Здесь, в отличие от известной системы уравнений (J. Hornbeck, J. Haynes, 1955), учтено, что процесс ионизации центров захвата электронов через фактор, связанный с темпом электронно-дырочной рекомбинации, ограничивает степень нейтрализации центров захвата и ограничивает, тем самым, максимальную величину ИПФ. В условиях можно положить, что *n*<<*m* и τ·(*dn*/*dt*)≈0. Тогда многократного захвата концентрация электронов в зоне проводимости во временных промежутков между импульсами собственного возбуждения (G=0) определяется соотношением:

$$n = \frac{\alpha m \tau_{cap}}{1 + \eta - m_{max}}.$$

Здесь  $\eta = \tau_{cap}/\tau$  - параметр обратный кратности захвата электронов,  $\tau_{cap} = 1/(\beta_e N_d)$  время захвата электронов при полностью ионизованных компенсирующих примесях и дефектах. При импульсном возбуждении, когда длительность периода импульсов собственного возбуждения много меньше характерного времени релаксации ИПФ и интервала наблюдения, концентрация захваченных электронов *m* в процессе импульсного возбуждения определяется выражением

$$m = m_{st}^* \left\{ 1 - \exp\left[ -\frac{Gt/Q - m}{m_{st}^* (1 + \eta - \frac{m_{st}^*}{m_{max}})} \right] \right\}.$$

В этом выражении  $m_{st}^* = m_{st}/[1 + (1 - m_{st}/m_{max})(Q-1)] - эффективная стационарная концентрация захваченных электронов для импульсного возбуждения со скважностью <math>Q$ ,  $m_{max} = kN_A[1/(1 + \xi/\eta)]$  - максимальная концентрация захваченных электронов,  $m_{st} = m_{max}/[1 + \alpha \eta m_{max}/G]$  - стационарная концентрация захваченных электронов при непрерывном возбуждении,  $\xi$ - коэффициент эффективности ионизации центров захвата рекомбинационным излучением. В первом приближении время рекомбинации  $\tau$  и соответственно параметр  $\eta = \tau_{cap}/\tau$  не изменяются в процессе возбуждения ИПФ. В противном случае параметр  $\eta$  становится функцией времени.

Для описания ИПФ полученные соотношения дополняются уравнением примесной фотопроводимости, записанным с учетом перезарядки примесей, и уравнением электрической нейтральности, учитывающим избыточную концентрацию дырок  $\Delta h$  на уровнях основной примеси и избыточную концентрацию дырок  $\Delta p_{\rm ph}$  в валентной зоне обусловленную захватом электронов.

С учетом вклада электронов и изменения подвижности относительная величина ИПФ *J*, определяемая как отношение примесной фотопроводимости после выключения собственного возбуждения к фотопроводимости до включения собственного возбуждения, записывается в виде

Здесь  $J_p$  и  $J_{\mu p}$  – отношение соответственно концентрации и подвижности дырок в условиях ИПФ к их исходным значениям до возбуждения ИПФ, а  $J_n$  и  $J_{\mu n}$  - отношение соответственно концентрации и подвижности электронов к

$$J = J_P J_{\mu p} + J_n J_{\mu n}.$$

начальным значениям этих параметров для дырок. При выполнении условия  $(\Delta p_{ph}-n) \le m$ , получено следующее выражение для величины  $J_p$  вносящей основной вклад в процесс возбуждения ИПФ:

$$J_{p} = \frac{(p_{ph} + \Delta p_{ph})}{p_{ph}} = \frac{(N_{A} - kN_{A} + m)k}{(kN_{A} - m)(1 - k)},$$
(2)

где  $p_{ph}$  -стационарная концентрация фотодырок при примесном возбуждении, k - степень компенсации полупроводника.

В процессе релаксации изменение во времени m(t) определено на основе системы уравнений (1). Для уровней захвата одного сорта i, при начальном условии  $m_i$  (t = 0) =  $m_{0i}$  и низкой скорости изменения концентрации электронов в зоне проводимости, концентрация захваченного на уровни заряда в процессе релаксации имеет вид:

$$\frac{m_i(t)}{m_{0i}} = \exp\left[\frac{-t}{\tau_{rel}} - B \cdot \left(1 - \frac{m_i(t)}{m_{0i}}\right)\right],\tag{3}$$

где  $B = m_{0i}/N_i$  - начальная степень перезарядки ловушек или  $B\approx 1/(1+\tau_{cap}/\tau))$ ,  $N_i$  - концентрация ловушек i-го типа ,  $\tau_{rel} = \tau_g (1 + \tau / \tau_{cap})$  - характерное время релаксации,  $\tau_g$  - характерное время ионизации ловушки,  $\tau_{cap}$  - характерное время захвата на ловушки. Если полупроводник содержит ловушки одного сорта, то в линеаризующем масштабе  $L(t)=m(t)/m_{0i}-\ln[m(t)/m_{0i}] = (-t/\tau_{rel}-B)$  релаксация индуцированной примесной проводимости представляет собой линейную зависимость от времени и время релаксации  $\tau_{rel}$  и параметра B определяются время жизни электрона на ловушке  $\tau_g$  и кратность захвата  $\tau/\tau_{cap}$ . При условии пренебрежения изменением подвижности уравнения (2) и (3) составляют простейшую одноуровневую модель релаксации ИПФ.

Расчет возбуждения ИПФ показал, что если концентрация электрически нейтральных примесей (включая кислород) имеет величину порядка  $10^{16}$  см<sup>-3</sup> при концентрации основной легирующей примеси (бор) порядка  $10^{15}$  см<sup>-3</sup>, то изменение подвижности с учетом рассеяния носителей заряда на фононах, нейтральных и заряженных примесях не превышает 10%.

Из приведенных соотношений следует, что при фиксированной величине скорости генерации разделенных электронно-дырочных пар G скорость нарастания ИПФ зависит от произведения параметров α и η, которое характеризует эффективность заполнения уровней захвата электронами. Максимальное значение ИПФ зависит от величины отношения  $\xi/\eta$ , которое определяет соотношение между вероятностью ионизации центра захвата рекомбинационным излучением и вероятностью захвата электрона на заряженный центр. Сопоставление разработанной модели с результатами экспериментального исследования процесса возбуждения ИПФ показало, что приближение независимости времени рекомбинации от уровня возбуждения выполняется лишь для J< 2,5. Для больших величин ИПФ становится существенным вклад электронной проводимости, так что монополярная проводимость переходит в биполярную проводимость. Для выделения квазиравновесной компоненты тока, связанной с ИПФ, были проведены исследования кинетики ИПФ при импульсном межзонном возбуждении в режиме генерации периодических импульсов на частоте 5 Гц со скважностью Q = 8, а измерение примесной фотопроводимости осуществлялось в промежутках между импульсами межзонного возбуждения спустя время 0,15 секунды после окончания импульса собственного возбуждения. Для уменьшения влияния случайных факторов экспериментальные временные последовательности усреднялись методом взвешенного среднего по пяти измерениям. Показано, что экспериментальные результаты по возбуждению ИПФ соответствуют расчету в

предположении, что зависимость временя рекомбинации от уровня инжекции подобна зависимости в модели рекомбинации Шокли-Рида. С учетом этой зависимости для расчета ИПФ необходимо решать нелинейную систему уравнений кинетики, в которой т зависит от концентрации свободных электронов. Для достаточно больших G, когда  $\alpha\eta m_{max}/G<<1$ , приближенное решение для *m* получено численным способом на основе решения методом итераций системы алгебраических уравнений, состоящей из приведенных выше соотношений с учетом зависимости  $\eta(\tau)$ . Согласие расчетных и экспериментальных данных получено в случае, когда время рекомбинации в процессе возбуждения ИПФ изменяется более чем на порядок величины. При этом монополярная проводимость переходит в биполярную.

В этом же разделе представлена теория возбуждения ИПФ с учетом существования различных типов центров захвата, появляющихся после облучения большой дозой электронного излучения, следует перейти к многоуровневой модели захвата электронов. На наличие нескольких типов центров захвата электронов в облученных образцах примесного кремния указывает тот экспериментальный факт, что в случае длительного собственного возбуждения нагрев образца до температуры 25 К не обеспечивает полного опустошения уровней захвата. В этом случае для полного опустошения уровней захвата необходим нагрев до температуры 35 К.

Облучение линейки фоторезисторов из шести образцов большими дозами электронов проводилось при температуре 10,6 К и средней мощности дозы электронного излучения 10-14 Гр/мин. Измерения примесной фотопроводимости (λ≈3 мкм) велись в режиме, при котором фототок существенно превышал темновой ток. Для устранения влияния перезарядки



Рис.6 Примесная фотопроводимость в Si<B>  $(N_B = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3})$  на длине волны 3 мкм в зависимости от интегрального потока электронов (E=6 MэB) при температуре 10 К.



Рис.7 Релаксация ИПФ в Si<B>  $(N_B=5\cdot 10^{15} \text{ см}^{-3})$  до (1) и после (2) облучения электронами с энергией E = 6 МэВ и дозой 4,1 кГр.

перед каждым измерением фототока при рабочей температуре исследуемый образец кремния кратковременно выдерживался при температуре 25 К. Установлено что, облучение кремния электронами интегральным потоком до  $4 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup> сопровождается уменьшением фототока по линейному закону. Отжиг в течение 3-х месяцев при комнатной температуре практически не меняет результата облучения (рис.6). Суммарное облучение Si<B> при температуре 10,6 К интегральным потоком электронов  $1,2 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup> привело к результирующему уменьшению примесной фотопроводимости в 2 раза. Измерение температурой зависимости примесной фотопроводимости до и после облучения электронами показало, что пропорциональное в логарифмическом масштабе уменьшение фоточувствительности наблюдается на всем наблюдаемом диапазоне температуро 7 до 16,5 К.

Исследование ИПФ в облученных образцах SI<B> показало существенное изменение ИПФ после облучения электронами дозой 4,1 кГр (рис.7) и рост быстрого компонента релаксации с возрастанием дозы облучения. Представление кинетики релаксации в линеаризующем масштабе L(t) в соответствии с разработанной моделью ИПФ позволило оценить характерное время быстрого и медленного компонентов релаксации. В результате облучения характерное время релаксации быстрого компонента возросло от нескольких секунд до 4 минут, а медленного компонента уменьшилось с 147 до 51 минуты. Полученные результаты непротиворечиво объясняются механизмами генерации дефектов донорного типа на основе междоузельного бора.

В разделе 3.4 представлены результаты действия электронов с энергией 6 МэВ и дозой до 4,1 Гр при температуре 10,6 К на прыжковую проводимость и индуцированную проводимость в образцах SI<B> с концентрацией бора  $N_B=10^{15} \div 5\cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>. Исследования велись при фоне теплового излучения, близкого к равновесному фону.

Под действием малых доз (порядка 10 рад и более) электронного излучения и светового межзонного возбуждения наблюдалась отрицательная проводимость, которая выражалась в уменьшении индуцированная проводимости образца и длительной (порядка нескольких часов) релаксации к значению проводимости определяемому естественным радиационным фоном. Для количественного описания этого явления создана модель изотермической релаксации индуцированной прыжковой проводимости , в соответствии с которой процесс протекает в замкнутой термодинамической системе доноров и акцепторов, находящейся в квазиравновесном состоянии и, следовательно, характеризующейся в каждый момент времени минимальной свободной энергией. Уравнение для концентрации n(t) носителей заряда прыжковой проводимости, зависящей от концентрации m(t) захваченных на ловушки дырок для слабо компенсированного полупроводника (для  $N_A >> n$ ) получено в виде:

$$\frac{n^{2}(t)}{[kN_{A} - m(t) - n(t)]N_{A}} = \exp(\frac{-2\varepsilon_{3}(m)}{k_{b}T}),$$
(4)

где  $\varepsilon_3(m) = E_d \{1 - 0.29k^{\overline{4}}[1 - m(t)/(kN_A)^{\overline{4}}]\}$  - эффективная энергия активации проводимости. При  $m \rightarrow 0$  оно переходит в известное уравнение Прайса для равновесной прыжковой проводимости. Уравнения (3) и (4) представляют собой модель процесса релаксации индуцированной прыжковой проводимости для одного типа компенсирующей примеси с параметрами  $(k, \tau_{rel}, B, E_d)$ , которые можно определить на основе данных эксперимента в предположении, что концентрация легирующей примеси  $N_A$  известна и подвижность носителей прыжковой проводимости не зависит от температуры. Определение компенсации k для k < 0,001 непосредственно по температурной зависимости равновесной прыжковой проводимости позволяет оценить только порядок величины.

На основе этой модели разработан защищенный патентом метод определения и контроля параметров примесного полупроводника с малой степенью компенсации. В соответствии с разработанным методом измерения проводятся в два этапа На первом этапе по температурной зависимости равновесной прыжковой проводимости определяется энергия активации  $E=2\varepsilon_3$ . На втором этапе для исключения из рассмотрения подвижности измеряется относительное изменение прыжковой проводимости в процессе изотермической релаксации. Возможность идентификации параметров модели по результатам эксперимента обеспечивается использованием критерия минимальной скорости релаксации. В соответствии с этим критерием в процессе релаксации системы реализуются только такие состояния (соотношения между



Рис.8 Релаксация индуцированной примесной проводимости в Si<B>  $(N_{\rm A}=4\cdot10^{16}$  см<sup>-3</sup>, k=0,00005) до (1) и после (2) облучения дозой 4,1 Гр.



Рис.9 Зависимость равновесного тока прыжковой проводимости в Si<B> ( $N_{\rm B}$ = 4·10<sup>16</sup> см<sup>-3</sup>,  $N_{\rm D}$ = 2·10<sup>12</sup> см<sup>-3</sup>) от дозы электронного излучения при T=10 K.

параметрами термодинамической модели), при которых скорость релаксации системы к состоянию термодинамического равновесия минимальна. В конечном итоге этот подход дает возможность одновременного определения как параметров полупроводника, ответственных за индуцированную проводимость так и величины компенсации полупроводника, которая определяет электрические свойства в состоянии термодинамического равновесия. Сравнительные измерения степени компенсации Si<B> ( $N_{\rm B}=2\cdot10^{16}\div8\cdot10^{16}$  см<sup>-3</sup>) разработанным методом и методом эффекта Холла, показали, что наблюдается согласие в пределах 15% в диапазоне компенсации  $2\cdot10^{-5}\div5\cdot10^{-4}$ .

В разделе 3.4 приведены также результаты исследования действия электронов с энергией 6 МэВ (доза до 4,1 кГр) на равновесную прыжковую проводимость и индуцированную прыжковую проводимость в образцах SI<B> с концентрацией бора  $N_B = 2 \cdot 10^{-16} \div 8 \cdot 10^{-16}$  см<sup>-3</sup> и с подавляющим преобладанием прыжковой проводимости над примесной проводимостью (рис. 8 и рис.9). Облучение велось при температуре 10,6 К и средней мощности дозы электронного излучения 10-14 Гр/мин. При измерении равновесной проводимости использовался цикл: облучение электронами - кратковременный отжиг при Т=25 К - охлаждение до рабочей температуры -измерение проводимости. Установлено, что равновесная прыжковая проводимость растет быстрее, чем по линейному закону и при дозе электронов 4,1 Мрад возрастает в 4 раза. Образование радиационных дефектов сопровождается ускорением долговременной релаксации. Образующиеся радиационные дефекты стабильны даже после длительной (1 год) выдержки при комнатной температуре. На основе разработанного метода контроля примесного кремния определена скорость генерации радиационных дефектов при температуре 10,6 К в монокристаллическом образце Si<B> с концентрацией бора  $N_{\rm B}$ =4·10<sup>16</sup> см<sup>-3</sup> под действием электронного излучения с энергией 6 МэВ.

В четвертой главе изложены основы метода суммы вариативных сверток предлагаемого для расчета долговременного радиационного отклика МОП-транзистора как нелинейной системы с конечной памятью. В соответствии с этим методом инициируемый внешним воздействием сложный нелинейный процесс, обусловленный различными (в том числе взаимосвязанными) физическими механизмами, представляется в виде суммы взаимосвязанных и описываемых кусочно-линейными уравнениями процессов, каждый из которых возбуждается на одном из последовательных временных интервалов сложного нелинейного процесса. Преимуществом метода вариативных сверток является то, что для расчета сложного нелинейного явления в системе с конечной памятью достаточно располагать полученными в линейном приближении решениями для составляющих данное сложное явление процессов, а также уравнениями, описывающими результирующее изменение внутренних параметров системы при протекании всех составляющих сложное явление процессов и изменении внешних условий. Под внутренними параметрами системы подразумеваются те параметры, которые определяют протекание важнейших процессов, входящих в описываемое сложное явление. В частности, для рассматриваемого нами случая радиационного отклика МОПсистемы, как показано в работе, важнейшими внутренними параметрами, определяющими протекание внутренних процессов, являются значения напряженности электрического поля в областях подзатворного окисла прилегающих к затвору и к границе раздела с кремнием.

Для обеспечения расчета методом суммы вариативных сверток нелинейного сдвига порогового напряжения n-канального МОП-транзистора:

- построена радиационная электрическая модель МОП-структуры, базирующаяся на классической электрической модели;
- в линейном приближении найдены упрощенные аналитические описания для основных процессов, ответственных за инициированный радиацией сдвиг порогового напряжения МОП-транзистора;
- в рамках развитой радиационной электрической модели МОП-структуры в линейном приближении получено аналитическое решение для инициированного радиацией сдвига порогового напряжения МОПтранзистора;
- разработан компьютерный алгоритм текущего счета, реализующий метод вариативных сверток, и способ идентификации параметров расчетной модели по результатам экспериментальных исследований.

Расчет сдвига порогового напряжения за счет образования в окисле объемного положительного заряда захваченных дырок ведется на основе механизмов тепловой эмиссии дырок с ловушек и туннелирования электронов из кремния на заполненные дырочные ловушки в окисле.

Учтено, что эффективность захвата дырок глубокими ловушками определяется, помимо концентрации ловушек, следующими факторами:

- скоростью генерации электронно-дырочных пар, зависящей от типа, спектрального состава и мощности источника радиации, величины дозового усиления за счет переходных эффектов у границы затвор-окись кремния;

- выходом свободных (избежавших рекомбинации) дырок, зависящим от характеристик источника радиации и напряженности электрического поля в области генерации электронно-дырочных пар и сбора дырок в окисле;

- захватом дырок в ловушки, зависящим от знака электрического поля в области сбора дырок и от величины электрического поля в слое окисла, содержащем дырочные ловушки.

Оценка времени  $t_0$  сбора дырок на глубокие ловушки у границы раздела Si/SiO<sub>2</sub> производится на основе дисперсионного прыжкового механизма движения дырок по мелким случайно расположенным ловушкам в SiO<sub>2</sub>. Скорости опустошения дырочных ловушек по механизмам тепловой эмиссии и туннелирования зависят от энергетического спектра заполненных ловушек, а также температуры и напряженности поля у границы с кремнием.

Аналитическое решение для парциального сдвига порогового напряжения МОП-транзистора в рамках развитой радиационной электрической модели в линейном приближении получается на основе интеграла свертки. Составляющую сдвига порогового напряжения за счет процесса взаимодействия дырок с глубокими ловушками в окисле на основе полученных выше результатов можно записать в виде следующего интеграла

$$\Delta V_{ot}(t) = -\int_{0}^{t} \frac{\delta V_{ht} d_{ox}}{\delta t \varepsilon_{ox}} (1 - \frac{X_{c}}{d_{ox}}) [1 - s_{T} \cdot \ln((t - t')/t_{0})] [1 - s_{E} \cdot \ln((t - t')/t_{E\min})] dt'$$

где обозначено  $\delta V_{ht}/\delta t$  - скорость изменения порогового напряжения за счет захвата дырок на ловушки, а  $s_T = 1/\ln(t_{Tmax}/t_0)$  и  $s_E = 1/\ln(t_{Emax}/t_{Emin})$  являются константами лишь в пределах одного из временных интервалов, на которые поделен весь период наблюдения. Таким образом, с течением времени эти величины изменяются кусочно-постоянным образом с учетом соотношений, описывающих состояние внутренних электрических полей в подзатворном диэлектрике. Кроме того, обозначено:  $X_c(t)=(X_{Tmax}+X_T(t))/2$  – координата положения центроида распределения захваченного заряда дырок, отсчитанная от границы раздела Si/SiO<sub>2</sub>; t<sub>Етmin</sub> и t<sub>Emax</sub> – времена после окончания импульсного воздействия, соответствующие достижению фронтом тепловой эмиссии соответственно нижней и верхней границам энергетического спектра ловушек.

Алгоритм расчета образования поверхностных состояний на границе раздела Si/SiO<sub>2</sub> определен в соответствии с водородной моделью градиента напряженных связей, которая, как показал расчет, в наибольшей степени соответствует экспериментальным результатам. Предположено, что процесс образования поверхностных состояний на первой стадии определяется рекомбинацией дырок с электронами, поскольку выделяемая при этом энергия расходуется на освобождение нейтрального атомарного водорода и на разрыв напряженных химических связей в области напряженных связей окисла граничащей с кремниевой подложкой. Выделяемый атомарный водород заряжается свободными дырками и движется в соответствии с ориентацией электрического поля перескоками между центрами захвата через окисел по термоактивационному механизму с характерной длиной скачка порядка среднего расстояния между атомами кислорода в окиси кремния. Энергия активации для этого процесса зависит от технологии изготовления окисла и как технологический параметр определяет температурную и полевую зависимость времени образования поверхностных состояний для МОП-приборов конкретной технологии. Вторым важным компонентом образования поверхностных состояний являются оборванные кислородные связи, которые при взаимодействии с ионами Н<sup>+</sup> образуют гидроксильные группы, способные передвигаться в направлении градиента напряженных связей (в направлении к границе с кремниевой подложкой). Соединение группы ОН с пограничным дефектом на границе с кремнием приводит к образованию поверхностных состояний. При расчете вероятность образования поверхностного состояния определяется произведением вероятностей упомянутых процессов.

Выделены две области окисла, ответственные за генерацию необходимых компонент для образования поверхностных состояний: область окисла между затвором и положительным объемным зарядом захваченных дырок и область окисла, содержащую глубокие ловушки прилегающую к границе раздела. В первой области окисла скорость генерации атомарного водорода определяется скоростью рекомбинации зависящей от мощности дозы излучения и напряженности электрического поля в этой области окисла. Для области объемного заряда захваченных дырок принято во внимание, что генерация атомарного водорода в ней определяется в основном не мощностью дозы излучения, а скоростью рекомбинации за счет туннелирования электронов из полупроводника на дырочные ловушки. Кроме того, учтено, что зарядка атомарного водорода в первой области осуществляется за счет части дырок. избежавших рекомбинации, в то время как во второй области в зарядке активное участие принимают свободные дырки генерированные через механизм тепловой эмиссии. Процесс образования ионов Н<sup>+</sup> в первой области, как очевидно, отвечает за "медленный" компонент образования поверхностных состояний, а процесс образования ионов Н<sup>+</sup> во второй области ответственен за "быстрый" компонент образования поверхностных состояний. Процесс образования ионов Н<sup>+</sup> во второй области ответственен за образование поверхностных состояний при отжиге в отсутствии воздействия ионизирующим излучением. Вторая область окисла ответственна за зависящее от электрического режима работы транзистора образование поверхностных состояний в процессе длительного (до полного опустошения дырочных ловушек) отжига после окончания радиационного воздействия.

Парциальный сдвиг порогового напряжения обусловленный "медленным" процессом генерации поверхностных состояний на границе раздела с кремнием. Интеграл свертки при нулевых начальных условиях имеет вид:

$$\Delta V_{it}(t) = \frac{\delta S_{H}^{+}}{\delta t} \int_{0}^{t} [1 - \frac{1}{(1 + \frac{(t - t')}{\tau})^{1/2}}] dt',$$

где t – время наблюдения, отсчитанное от момента начала облучения;  $\delta S_{H}^{+} / \delta t$  - зависящая от электрического поля и мощности дозы скорость генерации ионов водорода; т- характерное время для процесса образования поверхностных состояний (зависит от температуры и электрического поля в окисле). Суммарный сдвиг порогового напряжения МОП-транзистора в соответствии с разработанным алгоритмом расчета определяется с учетом изменения во времени внутренних параметров МОП-системы как алгебраическая сумма всех парциальных сдвигов, обусловленных каждым из сдвинутых по шкале времени парциальных процессов, инициированых ионизирующим воздействием.

В алгоритме расчета учитываются:

 параметры подзатворного окисла, включая ширину области напряженных связей у границы окисел-полупроводник, эффективную ширину спектра глубоких дырочных ловушек, содержание в окисле встроенного водорода;
 эффективная концентрация дырочных ловушек;



Рис. 10 Дозовая зависимость сдвига порогового напряжения  $\Delta V_{ht}$  и его составляющих  $\Delta V_{ot}$  и  $\Delta V_{it}$  для п-канального МОП-транзистора (толщина окисла  $d_{ox}=32$  нм, рентгеновское излучение Е max=10 кэВ, мощность дозы 200 крад/мин) с переключением электрического смещения 6 В  $\rightarrow$  0 В (а) и 0 В  $\rightarrow$  6 В (б) в процессе облучения. Линия -расчет, значки - эксперимент [Fleetwood D.M. et al. ].



Рис.11 Расчетный сдвиг порогового напряжения  $\Delta V_{ht}$  (значки +) и его составляющих  $\Delta V_{ot}$  и  $\Delta V_{it}$  (линии) для МОПтранзистора при переключении электрического смещения 0В  $\rightarrow$ 6В в процессе отжига. Значки  $\square$  и о - эксперимент [Fleetwood D.M. et al. ]



Рис.12 Расчетный сдвиг порогового напряжения  $\Delta V_{ht}$  (3, 3') и его составляющих  $\Delta V_{ot}$  (1, 1')и  $\Delta V_{it}$  (2, 2') как функция дозы при Vg=0 В при мощности дозы 200 крад/мин и 0,2 крад/мин соответственно. Точки - эксперимент Sandia National Laboratory.

- два эмпирических параметра, характеризующих полевую зависимость выхода свободных дырок в окисле в зависимости от вида ионизирующего излучения (электроны высокой энергии, гамма-излучение, низкоэнергетическое рентгеновское излучение) и полевую зависимость процесса образования поверхностных состояний на границе раздела окисел- полупроводник;

-параметры внешних условий и их изменение во времени (мощность дозы излучения, температура и электрический режим).

При сопоставлении с экспериментом определяются: ширина области напряженных связей на границе окисел-полупроводник, эффективная ширина спектра глубоких дырочных ловушек, содержание в окисле встроенного водорода, а также эффективная концентрация дырочных ловушек. Идентификация этих параметров возможна по результатам измерения компонентов  $\Delta V_{ot}$  и  $\Delta V_{it}$  порогового напряжения при переключении электрического смещения на затворе в процессе облучения и отжига. Получаемые значения параметров для спектра ловушек дырок и их пространственного распределения близки к значениям этих параметров, определенным другими методами.

В заключительном разделе четвертой главы приведены примеры расчета радиационного отклика МОП-транзисторов методом суммы вариативных сверток в сопоставлении с экспериментальными результатами, полученными в ведущих научных лабораториях для диапазона мощностей дозы 10<sup>+9</sup> ÷ 10<sup>-2</sup> рад/с для ряда радиационно-стойких КМОП-технологий. Продемонстрирована высокая эффективность принятой модели расчета, в том числе для описания таких нелинейных радиационных эффектов как радиационно-индуцированная нейтрализация заряда (рис.10) и ускорение образования поверхностных состояний на на границе раздела с кремнием при увеличении электрического смещения на затворе МОП-транзистора (рис.11). Показана возможность применения расчетной модели для оценки максимальной скорости изменения порогового напряжения МОП-транзисторов в условиях низкоинтенсивного облучения путем предельного перехода в область низких интенсивностей в расчетной модели, параметры которой в ускоренных наземных радиационных определены испытаниях (рис.12).Сделаны выводы о перспективах применения расчетной модели и метода суммы вариативных сверток.

## Основные результаты и выводы:

1. Впервые создана автоматизированная аппаратура для низкотемпературных радиационных исследований комбинированного действия светового и электронного излучений на примесную фотопроводимость в полупроводниках, которая реализует импульсный метод исследования кинетики возбуждения ИПФ, обеспечивает тепловое фоновое излучение ниже 10<sup>12</sup> фотон·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> и

возможность программного управления спектральными характеристиками электронного излучения.

2. Впервые на основе программного управления энергией ускоренных электронов в каждом импульсе излучения бетатрона и использования рассеивающего экрана создана методика лабораторного моделирования спектрально-угловых характеристик электронного излучения за конструкционной защитой космических аппаратов с эффективностью преобразования излучения до 10%.

4. Разработаны:

- физико-математическая модель индуцированной примесной фотопроводимости, учитывающая процесс перезарядки примесей и дефектов, а также нелинейности, связанные с изменением подвижности зарядов и времени электронно-дырочной рекомбинации.

- основанная на разработанной модели методика исследования кинетики возбуждения и релаксации индуцированной примесной фотопроводимости в примесном кремнии с использованием импульсного возбуждения и нагрева образца до температуры ионизации центров захвата неосновных носителей заряда,

6. Предложен новый способ определения степени компенсации и параметров примесного полупроводника ответственных за долговременную релаксацию проводимости, который основан на измерении изотермической релаксации индуцированной прыжковой проводимости и измерении температурной зависимости равновесной прыжковой проводимости. Алгоритм определения параметров полупроводника по результатам эксперимента базируется на применении критерия минимальной скорости релаксации.

7. Созданный метод суммы вариативных сверток и радиационная модель, позволяют определять долговременный нелинейный отклик порогового напряжения МОП-транзистора на радиационное воздействие как решение самосогласованной задачи в виде суммы последовательно сдвинутых во времени вариативных сверток с кусочно-постоянными начальными условиями.
8. Разработанный алгоритм метода суммы вариативных сверток позволяет оценить предельную скорость радиационного изменения порогового напряжения МОП-транзистора от дозы излучения в условиях приближенных к условиям космического пространства на основе модели расчета, параметры которой определены по результатам ускоренных радиационных испытаний.

Установлено, что для корректного описания нелинейного отклика радиационная модель и алгоритм расчета должны учитывать:

- перераспределение во времени электрического поля по МОП-структуре и толщине подзатворного окисла с учетом процессов захвата и отжига дырок, а также процесса образования поверхностных состояний на границе с кремнием;

- определяющее влияние полевой зависимости выхода свободных дырок в подзатворном окисле на полевую зависимость медленного процесса образования поверхностных состояний на границе с кремнием;

- определяющее влияние на образование поверхностных состояний в процессе отжига тепловой эмиссии дырок с глубоких ловушек у границы с кремнием и рекомбинации дырок на ловушках путем туннелирования электронов из кремния;

- технологические параметры транзистора, включая контактную разность потенциалов между затвором и подложкой, эффективную ширину энергетического спектра и концентрацию ловушек, толщину оксидного слоя и слоя напряженных связей, уровень легирования подложки.

## Публикации по теме диссертационной работы:

- 1. Зыков В. М., Евстигнеев В. В., Степанов Ю. М. Стабильность энергии электронов бетатрона // В сб. "Электронные ускорители", вып.2, М., Атомиздат, 1970, с.54-56.
- 2. Кононов Б.А., Дергобузов К.А., Зыков В.М. Торможение электронов веществом // Атомная энергия, 1970, т.29, вып. 3, с. 204 (деп. статья, 15 стр.)
- 3. Зыков В.М. Чувствительность контроля быстрыми электронами с использованием полупроводникового детектора // Дефектоскопия, 1971, № 4, с.127-130.
- 4. А.с. № 318856 СССР. Способ контроля поверхностных слоев. Авт.: Зыков В.М., Кононов Б.А. // Бюллетень изобретений, 1971, № 32.
- 5. Зыков В.М., Кононов Б.А. Полуэмпирический метод расчета энергетического распределения электронов за слоистыми экранами. В сб. IV Всесоюзного совещания по дозиметрии интенсивных потоков ионизирующмих излучений. 1972, М., с.27-28.
- 6. А.с № 397748 СССР Автор: Зыков В.М. Способ контроля толщины изделий и покрытий // БИ, 1973, №37.
- Борисов В.П., Зыков В.М., Кононов Б.А. Влияние соотношения между компонентами двухслойного барьера на дозу электронного излучения за барьером // В сб. " V Всесоюзное координационное совещание по дозиметрии", М.,1974, с. 31-32.
- Зыков В.М., Евстигнеев В.В. Исследование стабильности интенсивности электронного пучка бетатрона // В сб. "Труды II Межвузовской научнотехнической конференции по радиационным средствам и методам неразрушающего контроля изделий" Томск, 1973, Изд.во ТГУ, с. 47-50.
- 9. Зыков В.М., Юнда Н.Т. Статистический анализ радиометрического тракта электронного дефектоскопа // Статья деп. в ЦНИИ ТЭИ приборостроения, 8стр., № РД496. Реферат: РЖ ВИНИТИ "Метрология и измерительная техника", 1976, N7, реф. 7.32.281
- Заитов Ф.А., Зыков В.М., Шавров А.Е., Юнда Н.Т. Радиационные эффекты, инициируемые излучением на поверхности поликристаллических слоев сульфида свинца // Материалы Х Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, М., 1981,Изд. Моск. унта, с. 464-469.

- Зыков В.М., Юнда Н.Т. Исследование электропроводности слоев сульфида свинца, облучаемых электронами в различных газовых средах // Известия ВУЗов "Физика", 1979, N 9, с.112-115.
- Заитов Ф.А., Зыков В.М., Шавров А.Е., Юнда Н.Т. Радиационноповерхностные эффекты в поликристаллических слоях сульфида свинца // Труды Всесоюзного семинара "Радиац. эффекты в полупроводниковых приборах-80", Баку, Изд. ИФАН Азерб. ССР, 1980, с.89-90.
- 13. А. с. №890786 СССР Авторы: Зыков В.М., Юнда Н.Т. Фоторезистор // БИ, 1981, № 46
- 14. Зыков В.М., Юнда Н.Т. Анализ входной цепи электрометрического измерителя с обратной связью / / Метрология, 1981, №.3, с. 56-62.
- Заитов Ф.А., Зыков В.М., Матершев Ю.В., Шавров А.Е. Радиационные эффекты в поликристаличесих фотослоях сульфида свинца // Доклады АН Азерб. ССР, 1981, N 12, с. 35-37.
- Зыков В.М., Юнда Н.Т. Измеритель постоянной времени релаксации фототока, Приборы и техника эксперимента, 1982, N.3, с. 138-139.
- Зыков В.М., Киселев А.Н., Лукин А.Л., Ничинский Н.А.-"Гелиевый криостат для радиационных исследований фотопроводящих материалов", ПТЭ,1987, N.1, с.250
- А.с. №259410 СССР, Авторы: Зыков В.М., Панин В.Е., Теплоухов В.Л. и др. Приоритет от 3 октября 1986 г.
- 19. Зыков В.М., Заитов Ф.А., Горшкова О.В., Волков В.Ф., Киселев А.Н. "Контроль параметров примесного кремния по прыжковой проводимости при низкотемпературных облучениях электронами" // В сб."Вопросы стойкости ЭРИ, элементов и материалов к спецвоздействиям", М., Изд.НТЦ"Информтехника", 1990 г.,с.8-10
- 20. Зыков В.М., Заитов Ф.А., Волков В.Ф. и др. "Влияние захвата носителей заряда дефектами на примесную фотопроводимость" // В сб. "Вопросы стойкости ЭРИ, элементов и материалов к спецвоздействиям", М., Изд.НТЦ "Информтехника", 1990 г., с.11-12
- 21. Зыков В.М., Кононов Б.А., Евстигнеев В.В., Руденко В.Н. Электронная дефектоскопия и интроскопия многокомпонентных и однородных изделий. В сб.: Неразрушающие методы и средства контроля и их применение в промышленности Минск, Изд. "Наука и техника", 1973, с. 406-415.
- Зыков В.М., Киселев А.Н. "Метод контроля интенсивности ионизирующего воздействия при имитационных испытаниях примесных фотоприемников"// В сб. "Радиационная стойкость бортовой аппаратуры и элементов КА. Материалы конференции", Томск, 1991, с.79-80.
- 23. Зыков В.М., Волков В.Ф., Киселев О.С., Лукин А.Л., Самочернов В.М. "Моделирующая установка на основе бетатрона МИБ-6э для низкотемпературных радиационных испытаний" В сб. "Радиационная стойкость бортовой аппаратуры и элементов космических аппаратов. Материалы конференции", Томск, 1991, с.168-169.

- 24. Беспалов В.И., Верхотуров В.И., Графодатский О.С., <u>Зыков</u> В.М. Расчет полей электронного излучения в элементах бортовой аппаратуры в натурных и лабораторных условиях // В сб. "Радиационная стойкость бортовой аппаратуры и элементов космических аппаратов. Материалы конференции", Томск, 1991, с.33-34.
- 25. Беспалов В.И., Верхотуров В.И., Графодатский О.С., <u>Зыков</u> В.М., Кашковский В.В. Спектральные характеристики (<sup>90</sup>Sr- <sup>90</sup>Y)-моделирующей установки // В сб. "Радиац. стойкость бортовой аппаратуры и элементов космических аппаратов. Материалы конференции", Томск, 1991, с.154-155.
- 26. Беспалов В.И., Верхотуров В.И., Графодатский О.С., Зыков В.М. Спектральные характеристики <sup>60</sup>Со-моделирующей установки // В сб. "Радиационная стойкость бортовой аппаратуры и элементов космических аппаратов. Материалы конференции", Томск, 1991, с.156-157.
- 27. Верхотуров В.В., Графодатский О.С., Зыков В.М. и др. Моделирование энергетического спектра электронного излучения при испытаниях ЭРИ на ускорителях электронов// В сб. "Радиац. стойкость бортовой аппаратуры и элементов КА. Материалы конференции", Томск, 1991, с.158-159.
- 28. Зыков В.М., Киселев О.С. Лукин А.Л. Самочернов В.М Волков В.Ф. Дидоренко В.С.-" Автоматизированный комплекс аппаратуры для низкотемпературных имитационных испытаний фотоприемников на основе примесного кремния на ионизирующее воздействие" // В сб. "Радиационная стойкость бортовой аппаратуры и элементов космических аппаратов. Материалы конференции", Томск, 1991г., с.170-171.
- 29. Зыков В.М., Киселев А.Н., Лукин А.Л. и др. Кремниевые p+ -p -p+ структуры как детекторы ионизирующих излучений в условиях глубокого охлаждения // В сб. "Радиац. стойкость бортовой аппаратуры и элементов космических аппаратов. Материалы конференции", Томск, 1991, с.179-180.
- 30. V.I.Bespalov, V.M.Zykov et.al " The methodology of radiation testing of SC equipment elements and units with a service life of 10-15 years"- Межд. конференция "Проблемы взаимодействия ИСЗ с космической средой", Новосибирск, 15-19 июня 1992 г., Иркутск, 1992, с.117-118.
- 31. Зыков В.М.,Волков В.Ф. Лукин А.Л. -" Аппаратура для исследования фотостимулированных процессов при низкотемпературном радиационном дефектообразовании в полупроводниках" // В сб. "Тезисы докладов 8-й международной конференции по радиационной физике и химии неорганических материалов", том 1, Томск, Изд. ТПУ, 1993 г., с.148.
- 32. Зыков В.М.-" Индуцированная примесная проводимость в облученном электронами кремнии" // В сб. "Тезисы докладов 8-й международной конференции по радиационной физике и химии неорганических материалов", том 1, Томск, Изд. ТПУ, 1993, с.149.
- 33. Зыков В.М.- "Отрицательная прыжковая фотопроводимость в легированном бором кремнии облученном электронами с энергией 6 МэВ" // В сб."Тезисы докладов 8-й межд. конференции по радиац. физике и химии неорганических материалов", том 1, Томск, Изд. ТПУ, 1993 г., с.150.

- 34. Зыков В.М., Волков В.Ф. Лукин А.Л.- "Контроль параметров примесного кремния при низкотемпературных радиационных исследованиях" // В сб."Тезисы докладов 8-й межд. конференции по радиационной физике и химии неорганических материалов", 1993г., том 1, Томск, Изд. ТПУ, с.151.
- 35. Зыков В.М.- "Квазиравновесная релаксация в слабо компенсированном примесном кремнии, обусловленная низкотемпературной перезарядкой примесей и дефектов" // В сб."30-е совещание по физике низких температур, 6-7 сентября 1994 г. Тезисы докладов. Часть 2 Квантовые жидкости и кристаллы. Низкотемпературная физика твердого тела. "Дубна, 1994, с.104-105.
- 36. Патент RU 2025827 "Способ контроля параметров полупроводниковых материалов" / Авт.: Заитов Ф.А., Горшкова О.В., Зыков В.М., Волков В.Ф. Киселев А.Н. Бюллетень изобретений N24 от 30.12.94г.
- 37. Зыков В.М., Лисицын В.М., Яковлев А.Н. "Исследование долговременной релаксации примесной фотопроводимости в облученной p+ -p- p+ структуре на основе Si<B>", В Сб. "Радиационные гетерогенные процессы: Тезисы докладов шестой международной конференции", Часть 1, Кемерово: Кузбассвузиздат, 1995, с.81.
- 38. Зыков В.М. Нелинейная модель для радиационного отклика МОПтранзистора в условиях космоса и ускоренных испытаний // В сб.: Российская конференция "Взаимодействие космических аппаратов с окружающей средой. Иркутск, 1-3 ноября 1995 г.", Иркутск, 1995, с. 31-32.
- 39. Беспалов В.И., Зыков В.М., Кашковский В.В. Имитатор электронной компоненты радиационных поясов Земли на базе бетатрона // В сб.: Российская конференция "Взаимодействие космических аппаратов с окружающей средой. Иркутск, 1-3 ноября 1995 г.", Иркутск, 1995, с. 48-49.
- 40. Зыков В.М., Беспалов В.И., Кашковский В.В. "Лабораторное моделирование электронной компоненты радиационных поясов Земли для испытаний элементов аэрокосмической техники" В Материалах IV Всероссийской конференции по модификации структуры материалов пучками заряженных частиц. 23-25 мая 1996 г. Томск." Томск, Изд.ТПУ, 1996, с.196-198.
- 41. Зыков В.М., Лисицын В.М., Яковлев А.Н. Релаксация индуцированной примесной фотопроводимости в облученном электронами Si<B> // В сб."Тезисы докладов 9-й международной конференции по радиационной физике и химии неорганических материалов. РФХ-9, 23-25 апреля 1996 г." -Томск, Изд. ТПУ, с. 169.
- 42. Зыков В.М. "Модель и метод моделирования нелинейного радиационного отклика транзисторной структуры металл-окисел-полупроводник" // Известия высших учебных заведений "Физика", 1996, вып.7, с.52-58.
- 43. Беспалов В.И., Зыков В.М., Кашковский В.В. "Лабораторное моделирование на ускорителях вариаций спектральной плотности и потока электронов радиационных поясов Земли // Вопросы атомной науки и техники, сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 1997, вып.3-4, с. 135-141.

- 44. Беспалов В.И., Зыков В.М., Кашковский В.В. и др. "Лабораторное моделирование на ускорителях вариаций спектральной плотности и потока электронов радиационных поясов Земли" Известия ТПУ (Тем. вып. "Неразрушающий контроль и диагностика" / Под. ред. В.Л.Чахлова и О.А.Сидуленко) -Томск: Изд-во НТЛ, 1998, стр.31-39.
- 45. Zykov V.M. and Kiselyov A. N. "Testing of impurity atoms state in singlecrystal Si"- 7th European Conference on Non-Destructive Testing. 26-29 May 1998, Copenhogen, 1998, p.40.
- V.M. Zykov, A.N. Kiselyov. "Testing of impurity atoms state in single-crystal Si" in "Proceedings of the 7th European Conference on Non-Destructive Testing. Copenhagen, 26-28 May 1998.Printed in Denmark, 1998, V.1, P.281-286.
- 47. Зыков В.М., Киселев А.Н, "Применение метода изотермической релаксации прыжковой проводимости для контроля примесей и дефектов в слабо компенсированном Si<B>"// в Сб. "Материалы 10-й международной конференции по радиационной физике и химии неорганических материалов (РФХ-10), 21-25 сентября 1999 г.", г. Томск, с.159-160.
- Зыков В.М. "Стационарные и релаксационные электрические методы исследования точечных дефектов в полупроводниках" // Известия Томского политехнического университета, 2000, Том. 303 (2) с.137-161.
- 49. V.M.Zykov and A.N.Kiseljov "Excitation of Induced Extrinsic Photoconductivity in Si<B> With Small Degree of Compensation at Radiation Action" // In "1<sup>st</sup> International Congress on Radiation Physics, High Current Electronics, and Modification of Materials. Proceedings., Vol. 1, 11<sup>th</sup> International Conference on Radiation Physics and Chemistry of Condensed Matter.", Tomsk, 2000, p.406-411.
- 50. V.M.Zykov and M.I.Okuntsov "Self-Consistency Model of a Nonlinear Longterm Response of n-MOS Transistor on Ionizing Action"// In "1<sup>st</sup> International Congress on Radiation Physics, High Current Electronics, and Modification of Materials. Proceedings. Vol.1 11<sup>th</sup> International Conference on Radiation Physics and Chemistry of Condensed Matter.", Tomsk, 2000, p.466-469.
- 51. Соловьев Ю.А., Бюллер А.В., Зыков В.М. "Электризация диэлектрических материалов под действием электронов космического пространства" // Известия вузов. Физика. (Тематический сборник), 2000, №5, с.32-36.
- 52. Зыков В.М., Окунцов М.И., Лисицын В.М. Метод вариативных сверток для моделирования долговременного радиационного отклика полупроводниковых приборов // Вопросы атомной науки и техники, сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2001, вып.1-2, с. 135-141.
- 53. Зыков В.М. и др. Развитие методов классификации по уровням надежности и повышение стойкости ЭРИ к воздействию ионизирующих излучений космического пространства // Электронные и электромагнитные системы и устройства. Сб. научн. трудов НПЦ "ПОЛЮС", Томск: МГП РАСКО при изд. "Радио и связь", 2001, с. 181-192.