

На правах рукописи

Экз. № \_\_\_\_\_

ЕГОРОВ АНДРЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ЛАЗЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ЭФФЕКТОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ  
ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ ПРИ ПРЕДЕЛЬНЫХ УРОВНЯХ  
ИМПУЛЬСНОГО ИОНИЗИРУЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

05.13.05 - Элементы и устройства вычислительной техники  
и систем управления

**Автореферат диссертации**  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Автор:



Москва – 2015 г.

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ».

Научный руководитель: Никифоров Александр Юрьевич,  
доктор технических наук, профессор

Научный консультант: Скоробогатов Петр Константинович,  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Помазан Юрий Викторович,  
доктор технических наук, профессор,  
главный научный сотрудник Секции прикладных  
проблем при Президиуме РАН

Вавилов Владимир Алексеевич,  
кандидат технических наук,  
ведущий инженер-технолог ОАО «НИИМЭ и Микрон»

Ведущая организация: ФГУП Федеральный научно-производственный центр  
«Научно-исследовательский институт измерительных  
систем им. Ю.Е. Седакова»

Защита состоится 13 апреля 2015 г. в 15 час. 00 мин.  
на заседании диссертационного совета Д212.130.02  
в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» по адресу:  
115409 Москва, Каширское шоссе, 31, тел. 8(499) 324-84-98

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук,  
профессор

П.К. Скоробогатов

## Общая характеристика работы

**Диссертация направлена** на решение важной научно-технической задачи развития методов и средств оценки и прогнозирования стойкости изделий полупроводниковой микроэлектроники к импульсному ионизирующему воздействию (ИИВ) с предельными уровнями, основанных на использовании высокоинтенсивного лазерного излучения (ЛИ), имеющей существенное значение для создания бортовых устройств вычислительной техники и систем управления ракетных и ядерных комплексов.

### **Актуальность темы диссертации**

Радиационная стойкость является важнейшей эксплуатационной характеристикой изделий электронной компонентной базы (ЭКБ), определяющей ее живучесть и функциональную эффективность в составе бортовых устройств вычислительной техники и систем управления.

За последние десятилетия изделия ЭКБ претерпели качественные изменения, связанные с ростом их функциональной сложности и реализацией в виде сверхбольших интегральных схем (СБИС), в том числе с субмикронными размерами элементов и числом выводов 500 и более. Заданные требования по радиационной стойкости бортовых систем ракетных и ядерных комплексов к воздействию импульсных радиационных факторов ГОСТ РВ 20.39.414.2 по группам 5Ус-6Ус и 2Р-3Р потребовали реализации СБИС как на кремниевых, так и на гетероструктурах «кремний-на-изоляторе» (КНИ).

Современная система стандартов требует подтверждения уровней стойкости ЭКБ на всех этапах их жизненного цикла – в процессе разработки, производства и эксплуатации в РЭА. Наиболее эффективный подход к оценке стойкости ЭКБ к ИИВ связан с комплексным применением в ходе испытаний уникальных импульсных гамма-установок по типу ЛИУ-10, ЛИУ-30, малых ускорителей по типу «АРСА», а также импульсных лазерных источников, рациональное сочетание которых обеспечивает одновременно высокую достоверность, информативность и технико-экономическую эффективность радиационных испытаний.

Основным принципом обеспечения дозиметрической достоверности лазерных испытаний является их калибровка по эквивалентности откликов в ходе сравнительных испытаний на импульсных лазерных и гамма-источниках. Вместе с тем, имеющиеся ранее методы и средства калибровки были созданы и верифицированы для кремниевых интегральных схем (ИС) относительно невысокой степени интеграции и плотности металлизации. Проблема заключается в том, что современные СБИС имеют до 10 слоев металлизации, практически полностью перекрывающие поверхность кристаллов, площади которых достигают  $1 \text{ см}^2$  и более. Поэтому кроме очевидных трудностей и ограничений достижения предельных уровней испытательных гамма воздействий в диапазоне  $10^{12} - 10^{13} \text{ рад(Si)/с}$  (далее по тексту ед./с) имеются и значимые трудности по

обеспечению эквивалентных уровней лазерного воздействия, практически непреодолимые на основе использования ранее принятых подходов и методик испытаний.

Поэтому актуальными представляются исследования по развитию и обеспечению адекватности применения лазерных методов и средств моделирования эффектов мощности дозы в диапазоне предельных уровней импульсного воздействия до  $10^{13}$  ед./с, оценка предельных возможностей и границ применения лазерных методов, в том числе для СБИС на кремниевых и гетероструктурах.

Существующая базовая технология лазерного моделирования импульсных ионизационных эффектов в кремниевых структурах ЭКБ основана на использовании излучения твердотельных неодимовых лазеров с длиной волны 1,06...1,08 мкм, что связано с требованием равномерности ионизации по глубине кристалла, и обеспечивает в кремниевых структурах эквивалентную мощность поглощенной дозы до  $10^{12}$  ед./с., а для СБИС с большими размерами кристаллов и многослойной металлизацией – не более  $10^{10}$  -  $10^{11}$  ед./с. Дальнейшее повышение эквивалентной мощности дозы связано с необходимостью увеличивать плотность потока энергии ЛИ до уровней, способных нанести необратимые повреждения поверхностной структуры кристаллов СБИС вследствие термических эффектов. Переход на вторую гармонику ЛИ (0,53...0,54 мкм) не вполне решает проблему, так как в этом случае имеет место сильная неравномерность распределения ионизации по глубине кристалла, связанная с высоким значением коэффициента поглощения энергии в приповерхностных слоях кремния и поликремния.

Расширение границ лазерного моделирования до эквивалентной мощности поглощенной дозы  $10^{13}$  ед./с требует проведения дополнительных исследований с целью выявления и обоснования границ применимости лазерных методов моделирования в этом диапазоне, а также разработки новых методик и средств проведения лазерных испытаний при этих предельных уровнях воздействия, в том числе адаптированных для СБИС на КНИ структурах.

На решение указанных проблем путем развития методов и средств лазерного моделирования при предельных уровнях импульсного ионизирующего воздействия и направлена диссертация.

### **Состояние исследований по проблеме**

Физические основы базовой технологии, а также общие принципы и методы лазерного экспериментального моделирования объемных ионизационных эффектов в полупроводниковых приборах и микросхемах были сформулированы и обоснованы в трудах научной школы НИЯУ МИФИ - д.т.н. П.К. Скоробогатова и д.т.н. А.Ю. Никифорова и к.т.н. Б.А. Ахабаева. Результаты этих работ были развиты и успешно адаптированы для испытаний конкретных классов кремниевых микросхем в работах к.т.н. А.А. Демидова, к.т.н. Д.В. Бойченко., к.т.н.

Л.Н. Кессаринского. Адаптация лазерных методов для модерирования реакции микросхем на структурах «кремний на сапфире», в том числе при предельных уровнях воздействия, была выполнена в работах к.т.н. А.В. Улановой, к.т.н. Г.Г. Давыдова, а для приборов на GaAs – в работах д.т.н. Д.В. Громова, к.т.н. В.В. Елесина и к.т.н. Г.В. Чукова (все – НИЯУ МИФИ). Вопросам развития методических и технических средств лазерных имитационных испытаний микросхем посвящены труды д.т.н. А.И. Чумакова, к.т.н. А.А. Печенкина, О.Б. Маврицкого (НИЯУ МИФИ), к.т.н. В.С. Фигурова (АО «ЭНПО СПЭЛС»), В.В. Байкова (ФГУП «НИИП»), к.ф.-м.н. И.Б. Яшанина (ФГУП ФНПЦ «НИИС»).

Однако необходимо отметить, что к началу диссертационной работы вопросы лазерного моделирования высокоинтенсивного ИИВ на современные СБИС, обладающие большими размерами кристаллов, а также большим числом слоев металлизации, были изучены недостаточно. Требовалось развитие моделей воздействия мощного ЛИ на микроэлектронные элементы и структуры в условиях, когда нарушается линейная связь между скоростью генерации неравновесного заряда (эквивалентной мощностью поглощенной дозы) и интенсивностью ЛИ. Кроме того, необходимо было проанализировать возможность расширения границ лазерного моделирования до уровня мощности поглощенной дозы  $10^{13}$  ед./с за счет использования более коротковолнового (0,7...1 мкм) ЛИ, для чего потребовалась разработка и создание принципиально новых методики и экспериментальной установки, позволяющих осуществлять плавную перестройку рабочей длины волны ЛИ.

**Целью** диссертации является создание инструментария для испытаний ЭКБ на кремниевых и гетероструктурах на радиационную стойкость при импульсном ионизирующем воздействии с предельной эквивалентной мощностью дозы (до  $10^{13}$  ед./с) на основе развитых лазерных методов моделирования доминирующих ионизационных эффектов и созданного оригинального экспериментального комплекса, обеспечивающего рациональное сочетание достоверности, доступности, технико-экономической эффективности и экологической безопасности испытаний.

Указанная цель достигается решением в работе следующих **задач**:

- анализ и моделирование эффектов воздействия ЛИ на полупроводниковые структуры ЭКБ в диапазоне предельных интенсивностей воздействий, позволяющие адекватно описать ионизационные отклики структур;
- выбор и обоснование рациональных параметров лазерного воздействия для обеспечения адекватного моделирования эффектов высокоинтенсивной ионизации современных и перспективных кремниевых и гетероструктур микроэлектроники в диапазоне предельных уровней воздействий;
- научное обоснование границ применимости лазерных методов моделирования ионизационных эффектов в полупроводниковых структурах по

длине волны и интенсивности воздействия;

– развитие общей методики лазерного экспериментального моделирования полупроводниковых структур на основе кремния и КНИ, включая технические требования и ограничения на характеристики ЛИ;

– разработка, реализация и апробация новых экспериментальных установок для испытаний ЭКБ на стойкость к мощным импульсным ионизирующим воздействиям;

– получение и систематизация новых экспериментальных данных по результатам лазерного моделирования эффектов мощного импульсного ионизирующего воздействия на современные изделия микроэлектроники.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

1. Развита нелинейная модель взаимодействия лазерного излучения с полупроводниковыми структурами ЭКБ, обеспечивающая одновременный учет оптических и ионизационных эффектов в диапазоне предельных уровней ионизирующего воздействия до разрушения поверхности кристалла.

2. Выявлены и проанализированы ограничивающие эффекты и определены границы применимости ЛИ в диапазоне длин волн 0,53...1,08 мкм для адекватного моделирования эффектов мощного импульсного ионизирующего воздействия на кремниевые и гетероструктуры ЭКБ.

3. Предложены и обоснованы методы повышения адекватности и эффективности лазерного моделирования объемных ионизационных эффектов в микроэлектронных структурах в диапазоне предельных интенсивностей на основе выбора рациональных интенсивности и длины волны ЛИ, использования облучения со стороны подложки.

4. Разработана методология реализации лазерных моделирующих воздействий в диапазоне длин волн 0,7...1 мкм, энергий в импульсе - до 100 мДж, адаптированная для испытаний широкой номенклатуры изделий микроэлектроники на стойкость к импульсным ионизирующим воздействиям в диапазоне предельных уровней – до  $10^{13}$  ед./с.

**Практическая значимость работы:**

1. Создан ряд экспериментальных комплексов на основе оригинальных лазерных установок «РАДОН-7», «РАДОН-8», «РАДОН-8Н», «РАДОН-8М», обеспечивающих возможность проведения испытаний СБИС на стойкость к импульсным ионизирующим воздействиям с эквивалентным уровнем мощности дозы до  $10^{13}$  ед./с. Лазерные установки аттестованы и внедрены в ОАО «ЭНПО СПЭЛС», ФГКУ «12 ЦНИИ» МО РФ, ФГУП ФНПЦ «НИИИС». Получено авторское свидетельство на изобретение.

2. Развита и усовершенствована базовая методика лазерных испытаний изделий микроэлектроники на кремниевых и гетероструктурах на стойкость к ИИВ в диапазоне предельных уровней до разрушения кристаллов, включенная в ГОСТ

РВ 5962-004.10-2012 «Изделия электронной техники. Микросхемы интегральные. Методы испытаний. Испытания на стойкость к воздействию специальных факторов и импульсную электрическую прочность».

3. Результаты диссертации внедрены в ОАО «ЭНПО СПЭЛС» при радиационных испытаниях широкой номенклатуры (более 100 типов) отечественных и зарубежных СБИС, а также прогнозировании радиационной стойкости комплексов бортовой аппаратуры на их основе, в ФГУП ФНПЦ «НИИИС» для радиационной отбраковки СБИС на пластинах, в ОАО «НИИМЭ и Микрон», в ГНЦ «НПК «Технологический центр МИЭТ», в ЗАО «ПКК «Миландр» при разработке широкой номенклатуры отечественных СБИС.

4. Результаты диссертации вошли в отчетные материалы по НИР («Микология», «Колун», «Литтос-ку», «Термомеханика», «Идентификация» и др.), выполненных по заказам Минобороны РФ, Росатома, Минпромторга РФ и подведомственных им предприятий.

Результаты, выносимые на защиту:

1. Нелинейная модель взаимодействия ЛИ с полупроводниковыми структурами, обеспечивающая одновременный учет оптических и ионизационных эффектов в диапазоне предельной степени ионизации до разрушения кристалла, обосновывающая потенциальную возможность и адекватность лазерного моделирования реакции современных изделий микроэлектроники на кремниевых и гетероструктурах до предельных уровней ионизирующего воздействия  $10^{13}$  ед./с.

2. Усовершенствованная методика реализации лазерных моделирующих воздействий в диапазоне длин волн 0,7...1 мкм, энергий в импульсе - до 100 мДж, адаптированная для испытаний широкой номенклатуры изделий микроэлектроники на стойкость к импульсным ионизирующим воздействиям в диапазоне предельных уровней – до  $10^{13}$  ед./с. Научно-обоснованные рациональные значения длин волн ЛИ для основных классов микроэлектронных структур: 0,9...1 мкм для кремниевых объемных и 0,8...0,9 мкм для тонкопленочных гетероструктур.

3. Созданный ряд экспериментальных испытательных комплексов на основе оригинальных лазерных установок «РАДОН-7», «РАДОН-8», «РАДОН-8Н», «РАДОН-8М», обеспечивающих возможность проведения испытаний СБИС на стойкость импульсным ионизирующим воздействиям с эквивалентным уровнем мощности дозы до  $10^{13}$  ед./с и широко внедренный в практику радиационных испытаний СБИС в процессе разработки и производства.

4. Доработанная и расширенная базовая методика лазерных испытаний изделий микроэлектроники на кремниевых и гетероструктурах в диапазоне предельных уровней импульсного ионизирующего воздействия, включенная в ГОСТ РВ 5962-004.10-2012 «Изделия электронной техники. Микросхемы интегральные. Методы испытаний. Испытания на стойкость к воздействию специальных факторов и импульсную электрическую прочность» и реализованная

в ходе радиационных испытаний более 100 типов изделий микроэлектроники практически всех функциональных классов и конструктивных групп.

#### **Апробация работы:**

Основные результаты диссертации были представлены и обсуждались на российских и международных конференциях, семинарах и выставках: Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость (г. Лыткарино, Россия, 2006, 2008 и 2013 гг.); The Conference on Radiation Effects on Components and Systems – RADECS (Oxford, UK, 1998); Thematic Workshop on Laser Testing of Radiation Effects – RADLAS (Paris, France, 2011); IEEE Radiation Effects Data Workshop – REDW (Indian Wells, USA, 1996); Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем – МЭС (Московская обл., Россия, 2012 г.); Научная сессия НИЯУ «МИФИ» (г. Москва, Россия, 2001, 2006 гг.), международная промышленная выставка Radiation Effects on Components and Systems – RADECS (Oxford, UK, 2013), международная промышленная выставка Nuclear and Space Radiation Effects – NSREC (Paris, France, 2014).

**Публикации:** Основные положения диссертационной работы изложены в 16 печатных работах (в период с 1996 по 2015 гг.), в том числе 4 – в изданиях, входящих в перечень ВАК, 8 – в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация содержит 134 страницы, в том числе 68 рисунков, 10 таблиц, список литературы из 104 наименований и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и списка использованных сокращений.

### **СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Введение** обосновывает актуальность диссертационной работы, кратко обобщает результаты ранее выполненных научных работ по тематике диссертации, обосновывает цель и задачи диссертации.

**В первой главе** проанализированы основные радиационные эффекты, возникающие при мощном ИИВ на полупроводниковые материалы и структуры, рассмотрены особенности и ограничения моделирования объемных радиационных эффектов с учетом влияния нелинейных эффектов, связанных с высокой интенсивностью ионизирующего воздействия.

**Вторая глава** посвящена расчетно-экспериментальному моделированию объемных ионизационных эффектов в кремниевых и гетероструктурах с использованием импульсного ЛИ, выбору и обоснованию оптимальных параметров ЛИ для различных типов полупроводниковых структур ЭКБ, а также методам повышения эквивалентного уровня воздействия.

**В третьей главе** представлены разработанные при непосредственном участии автора лазерные имитационные установки (ЛИУ), обеспечивающие в кремниевых структурах эквивалентную мощность поглощенной дозы до  $10^{13}$  ед./с.



Рассмотрены конструктивные особенности созданных ЛИУ и их основные параметры, критичные для рассматриваемых применений.

**Четвертая глава** содержит экспериментальные результаты моделирования радиационного поведения выбранных изделий ЭКБ, полученные при предельных уровнях воздействия с использованием разработанных лазерных имитационных методик и технических средств.

**Заключение** обобщает основные теоретические и практические результаты диссертации.

### **Моделирование и анализ эффектов импульсного ионизирующего воздействия в диапазоне предельных интенсивностей на полупроводниковые структуры электронной компонентной базы**

ИИВ на полупроводниковые и диэлектрические области изделий ЭКБ вызывает эффекты ионизации и возбуждения электронных оболочек атомов. Мерой интенсивности ионизации служит количество генерируемых при ИИВ неравновесных электронно-дырочных пар в единице объема в единицу времени (скорость генерации носителей). Последующая релаксация индуцированного заряда проявляется в виде объемных ионизационных эффектов, заключающихся в кратковременном и/или долговременном (остаточном) изменении параметров изделий ЭКБ. Одним из основных механизмов, определяющих ионизационную реакцию полупроводниковых структур ЭКБ, является образование ионизационного тока *p-n* перехода при ИИВ.

В диапазоне малых интенсивностей ИИВ (до  $10^9$  ед./с), концентрация генерированных излучением неравновесных носителей много меньше равновесной концентрации основных носителей заряда и не изменяет внутренних электрических полей в облучаемом полупроводнике. В этом случае ионизационный ток *p-n* перехода имеет линейный характер по отношению к интенсивности ионизации, что позволяет получить аналитические решения для некоторых конкретных структур.

В диапазоне предельных уровней ИИВ, создающих в полупроводниковых областях ЭКБ мощность поглощенной дозы до  $10^{13}$  ед./с, на процесс образования и проявления ионизационных эффектов оказывают существенное влияние различные нелинейные эффекты, такие как образование индуцированных электрических полей, обусловленных током неравновесных носителей, зависимость скорости рекомбинации и подвижности носителей от концентрации последних и другие. Анализ поведения ЭКБ в этой области уровней воздействий требует, как правило, использования численных методов моделирования ионизационной реакции.

В зависимости от особенностей конструктивно-технологического исполнения изделия, режима его работы и требуемой точности моделирования используются три основных модели анализа ионизационной реакции: диффузионно-дрейфовая, термодинамическая и гидродинамическая. Для моделирования объемных ионизационных эффектов в полупроводниковых

структурах ИС чаще всего используется диффузионно-дрейфовая модель, основанная на предположении об изотермичности и стационарном характере процессов переноса носителей заряда, что справедливо элементов ЭКБ с линейными размерами не менее 1 мкм, толщинами слоев свыше 0,05 мкм, градиентами концентрации легирующей примеси не более  $10^{24}$  см<sup>-4</sup>, при плотностях тока через р-п переходы не более  $10^6$  А/см<sup>2</sup> и на временных интервалах более  $10^{-10}$  с.

Применительно к объемным ионизационным эффектам в полупроводниковых структурах ЭКБ в большинстве практических случаев диффузионно-дрейфовая модель позволяет получить удовлетворительные результаты по следующим основным причинам:

– ионизационная реакция полупроводниковых структур ЭКБ определяется, в основном, эффектами не в рабочих, а в периферийных областях активных элементов, характерные размеры которых даже в перспективных СБИС превышают единицы мкм, т.е. существенно больше характерных длин релаксации импульса и энергии;

– длительность импульса излучения и характерные времена реакций элементов (единицы и десятки наносекунд) существенно больше времени релаксации импульса и энергии носителей заряда;

– даже при максимальных уровнях ИИВ концентрации неравновесных носителей в полупроводниковых областях ЭКБ не превышают  $10^{19}$  см<sup>-3</sup>, а их градиенты -  $10^{23}$  см<sup>-4</sup>, что позволяет, во-первых, пренебречь эффектом динамического сужения запрещенной зоны и, во-вторых, считать феноменологические электрофизические параметры полупроводника независимыми от условий возбуждения.

Таким образом, в качестве базовой модели для анализа ионизационной реакции полупроводниковых структур ЭКБ можно использовать фундаментальную систему уравнений (ФСУ) Пуассона, непрерывности и переноса в диффузионно-дрейфовом приближении с учетом скоростей генерации и рекомбинации неравновесных носителей. Электрофизические параметры областей анализируемой структуры входят в эту систему как параметры, а геометрия диффузионных областей и контактов учитывается граничными условиями.

Вследствие нелинейности ФСУ, получение аналитических решений, описывающих нестационарные ионизационные процессы, даже в случае простейших полупроводниковых структур, представляется затруднительным. Положение усложняет неоднородный характер переноса носителей в большинстве реально используемых структур. Поэтому достоверный анализ ионизационной реакции ЭКБ во всем диапазоне интенсивностей ИИВ на практике возможен только на основе использования численных методов моделирования.

Поглощение энергии ИИВ сверхвысоких уровней (до  $10^{13}$  ед./с) в материалах

ЭКБ за короткий промежуток времени может привести к появлению существенных термоупругих напряжений, потенциально способных вызвать механические повреждения элементов. Однако, проведенные ранее оценки показывают, что во всем заданном диапазоне интенсивностей ИИВ кремниевые структуры ЭКБ не испытывают существенных дополнительных температурных и механических напряжений, способных повлиять на показатели стойкости испытываемых изделий.

### **Лазерное имитационное моделирование объемных ионизационных эффектов в кремниевых полупроводниковых структурах**

Экспериментальное определение показателей стойкости ЭКБ в диапазоне предельных уровней ИИВ с использованием моделирующих установок ограничивается дистанционным характером измерений в условиях наводок и помех, высокой стоимостью, низкими производительностью и энергоэффективностью, а также экологическими особенностями радиационных источников тормозного гамма-излучения большой мощности, что ограничивает возможности проведения всей полноты радиационных испытаний и исследований, необходимых для анализа критических состояний, режимов и условий работы современных сложных многофункциональных изделий ЭКБ на всех этапах их жизненного цикла.

Одним из наиболее эффективных методов решения этой задачи является рациональное использование экспериментальных имитационных методов моделирования. Применительно к ИИВ наиболее адекватное и эффективное моделирование доминирующих объемных ионизационных эффектов возможно при использовании в качестве имитирующего воздействия ЛИ.

Воздействие ЛИ с длиной волны в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне на полупроводники обладает рядом принципиальных отличий от более высокоэнергетичного (гамма- или рентгеновского) ИИВ: распределение ионизации по объему полупроводника может существенно отличаться от однородного, имеет место сильная зависимость коэффициента поглощения от уровня легирования полупроводника, металлизация на поверхности кристалла препятствует распространению ЛИ вглубь активных областей, отсутствует ионизация диэлектрических слоев, рожденные электроны практически полностью термализованы, и т.п. Однако, перечисленные отличия не препятствуют принципиальной возможности лазерного имитационного моделирования доминирующих эффектов высокоэнергетичных ИИВ на полупроводниковые структуры ЭКБ.

В работах П.К. Скоробогатова и А.Ю. Никифорова была обоснована адекватность лазерных методов применительно к изделиям микронных проектных норм. Однако следует отметить, что современная технология (субмикронные проектные нормы, широкое использование КНИ) требует дальнейшего развития лазерных методов с учетом оптических свойств используемых в приборе

полупроводников, особенностей конструкции прибора и на этой основе – к поиску источника излучения с параметрами, наиболее близкими к оптимальным.

В диапазоне низких и средних интенсивностей ЛИ распространение однородного лазерного пучка в полупроводнике описывается уравнением:

$$dI_a(x,t)/dx = -\alpha_i(x,t) \cdot I_a(x,t), \quad (1)$$

где  $I_a(x,t)$  – плотность потока энергии (интенсивность) ЛИ в полупроводнике;  $\alpha_i(x,t)$  – полный коэффициент поглощения ЛИ.

Если концентрация неравновесных носителей сравнительно невелика, то уравнение (1) становится линейным и его решение для полубесконечного образца полупроводника с учетом отражения от поверхности имеет вид закона Бугера:

$$I_a(x,t) = I_l(t)(1 - R)\exp(-\alpha x), \quad (2)$$

где  $\alpha$  – полный (с учетом поглощения на неравновесных носителях) коэффициент поглощения ЛИ;  $I_l(t)$  – зависимость от времени интенсивности ЛИ, падающего на поверхность полупроводника;  $R$  – коэффициент отражения ЛИ.

Высокая скорость процессов фотоионизации по сравнению со временами рекомбинации неравновесных носителей в полупроводнике приводит к тому, что временная зависимость интенсивности ионизации повторяет форму импульса ЛИ. Учитывая то, что величина квантового выхода фотоионизации вблизи края основной полосы поглощения в полупроводнике приблизительно равна единице, распределение скорости генерации неравновесных носителей заряда по глубине полубесконечного образца в линейном приближении может быть записано в виде:

$$G(x,t) = \alpha_{мз} I_l(t)(1 - R)\exp(-\alpha x)/h\nu, \quad (3)$$

где  $\alpha_{мз}$  – межзонный или собственный коэффициент поглощения ЛИ в полупроводнике;  $h\nu$  – энергия кванта.

Исходя из этого, выражение для распределения эквивалентной мощности поглощенной дозы по глубине полубесконечного полупроводника имеет вид

$$P_{экр}(x,t) = (1 - R)\alpha_{мз}[I_l(t)/(h\nu \cdot g_0)]\exp(-\alpha x), \quad (4)$$

где  $g_0$  – эффективность ионизации, составляющая  $4,3 \cdot 10^{13}$  пар/(см<sup>3</sup>·ед.) для кремния.

В частности, у поверхности кремния при использовании излучения твердотельного неодимового лазера с длиной волны 1,06 мкм

$$P_{экр}(0,t) \cong 1,24 \cdot 10^5 (1 - R)\alpha I_l, \quad (5)$$

где при  $I_l$  в ваттах на квадратный сантиметр и  $\alpha$  в обратных сантиметрах мощность поглощенной дозы получает размерность в рад/с по кремнию.

Линейное приближение (5) практически всегда справедливо до мощностей доз, эквивалентных  $10^{12}$  ед./с, при облучении полупроводниковых структур ЭКБ «сверху», так как активные области приборов расположены на небольшой глубине и дополнительное поглощение на неравновесных носителях сказывается слабо. При более высоких уровнях возбуждения линейная связь между скоростью генерации неравновесного заряда (эквивалентной мощностью поглощенной дозы) и интенсивностью ЛИ, в общем случае, нарушается. Основными нелинейными

эффектами, ограничивающее влияние которых было проанализировано и оценено в работе, являются: поглощение ЛИ на неравновесных носителях; эффект Бурштейна-Мосса, плазменный резонанс, двухфотонное поглощение, нагрев полупроводника.

Результаты проведенных оценок показывают, что для расчета зависимости эквивалентной мощности поглощенной дозы в кремнии в диапазоне предельных интенсивностей излучения лазера достаточно учесть зависимость коэффициента поглощения излучения от концентрации неравновесных носителей заряда, а также влияние Оже-рекомбинации на время жизни неравновесных носителей.

Анализ также показывает, что в режиме облучения «снизу» нелинейный характер зависимости  $P_{\text{экв}}(I_L)$  ограничивает максимально достижимую мощность поглощенной дозы в активных объемах ЭКБ значением порядка  $(2...3) \cdot 10^{13}$  ед./с. При этом неравномерности распределения ионизации по глубине остается относительно небольшой и не вызывают существенных нарушений адекватности при моделировании однородной ионизации. Однако для увеличения эквивалентной мощности дозы, создаваемой ЛИУ с  $2 \cdot 10^{12}$  до  $10^{13}$  ед./с необходимо увеличение мощности лазерного импульса в  $10...30$  раз (в зависимости от условий облучения и типа подложки) по сравнению с традиционно используемыми ЛИУ по типу «РАДОН-5», что может привести к термодинамическим эффектам на обратной стороне кристалла ЭКБ.

Длина волны ЛИ 1,06 или 1,08 мкм соответствует глубине поглощения около 700 мкм в кремнии и является достаточной для большинства кремниевых микросхем объемной и эпитаксиальной технологий. Однако низкая эффективность использования энергии ЛИ в кремнии заставляет применять высокоинтенсивные потоки ЛИ для обеспечения требуемых предельных значений эквивалентных мощностей поглощенных доз. Это тем более справедливо при воздействии ЛИ на тонкопленочные КМОП КНИ и КНС приборы, так как эффективность использования энергии ЛИ вследствие поглощения в их еще более тонком (менее одного мкм) приборном слое существенно ниже, чем в случае объемных ИС.

Анализ полученных ранее результатов показал, что дальнейшее повышение эквивалентной мощности дозы за счет роста интенсивности ЛИ ограничивается энергетикой существующих излучателей и возможностью повреждения кремниевых структур вследствие термодинамических эффектов. Более перспективным признано повышение эквивалентной мощности поглощенной дозы в полупроводнике за счет использования более коротких длин волн ЛИ с более высокими значениями коэффициентов поглощения энергии.

Особенности конструкции *КНИ и КНС микросхем*, характеризующихся высокой стойкостью к ИИВ, позволяют существенно расширить возможности и диапазоны применимости лазерных имитационных методов по следующим причинам:

– малая толщина приборного слоя КНИ и КНС микросхем дает возможность уменьшения длины волны ЛИ при сохранении удовлетворительной равномерности распределения интенсивности ионизации по глубине приборного слоя;

– малые значения времен жизни носителей в приборном слое КНС микросхем существенно снижают достижимые максимально возможные концентрации неравновесных носителей заряда. Это уменьшает вклад и влияние нелинейных оптических эффектов на поглощение ЛИ и определение эквивалентной мощности поглощенной дозы.

Расчет с помощью доработанной программы DIODE-SOI зависимости величины ионизационного тока от длины волны ЛИ для тестовой КМОП КНС диодной структуры показывает, что во всем диапазоне длин волн (0,5...1,1 мкм) величина ионизационного тока увеличивается с уменьшением длины волны. Поэтому при выборе источника ЛИ для моделирования объемных ионизационных эффектов таких структур необходимо ориентироваться на более короткие длины волн. Весьма удобным в этом отношении представляется использование второй гармоники ЛИ (использование нелинейных преобразователей длины волны 1,06 – 1,08 мкм в длину волны 0,53 – 0,54 мкм). Для создания эквивалентной мощности дозы  $10^{13}$  ед./с на длине волны 0,53 мкм достаточно всего  $10^5$  Вт/см<sup>2</sup>, что технически достаточно просто реализовать.

Расчет также показывает, что ионизационная реакция КМОП КНС элемента по форме ионизационного тока практически идентична для лазерного (при воздействии импульса ЛИ 1-ой и 2-ой гармоник) и высокоэнергетичного ИИВ. Это, в частности, дает возможность провести калибровку эквивалентной мощности дозы, создаваемой 2-ой гармоникой ЛИ, по амплитуде ионизационного тока от воздействия ЛИ на длине волны 1,06 мкм.

Однако следует отметить, что очень высокое поглощение ЛИ с длиной волны 0,53 мкм в областях поликремниевых затворов КМОП КНС структур и соответствующее снижение степени ионизации подзатворных областей способно вызвать снижение эквивалентного уровня мощности дозы, увеличить неравномерность распределения интенсивности ионизации по поверхности. Поэтому была исследована возможность использования промежуточных длин волн для моделирования объемных ионизационных эффектов в КМОП КНС ИС.

На рис. 1 приведены результаты моделирования зависимости эквивалентной мощности поглощенной дозы в КНС БИС ОЗУ от длины волны ЛИ. Из рис. 1 видно, что при переходе от длины волны ЛИ 1,06 к 0,8 мкм эквивалентная мощность дозы возрастает на два порядка без увеличения интенсивности ЛИ.

С целью поиска оптимальной длины волны ЛИ было выполнено моделирование ионизационной реакции КМОП КНС инвертора с использованием программы DIODE-SOI. Установлено, что для длины волны ЛИ 0,752 мкм распределения эквивалентной мощности поглощенной дозы по глубине

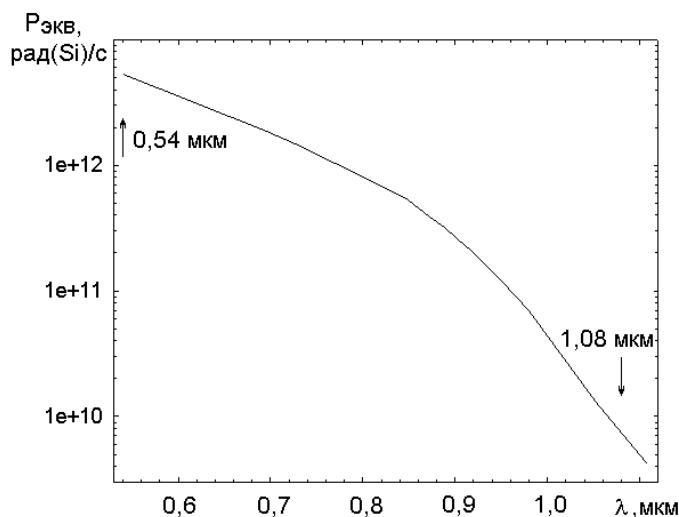


Рис. 1 – Расчетная зависимость эквивалентной мощности поглощенной дозы, создаваемой ЛИ интенсивностью  $10^4$  Вт/см<sup>2</sup> от длины волны ЛИ в КНС БИС ОЗУ.

подзатворной области и областях стока и истока (имеющие различный уровень легирования) практически совпадают, что говорит о равномерном распределении интенсивности ионизации по площади инвертора в областях свободных от металлизации. Иная ситуация имеет место при использовании ЛИ с длинами волн 1,06...1,08 мкм, для которых характерно сильная зависимость значений коэффициентов поглощения от уровня легирования областей кремния, что проявляется в виде заметной разницы в значениях эквивалентной мощности в области стока (истока) и канала.

Следовательно, переход на более короткую длину волны ЛИ не только повышает эффективность лазерного имитационного моделирования, но и способствует более равномерному распределению эквивалентной мощности дозы по площади КМОП КНС микросхемы.

Необходимо, однако, отметить, что для КМОП КНС структур поликремниевые затворы МОП-транзисторов могут служить дополнительным источником неравномерности распределения интенсивности ионизации по площади микросхемы. При использовании ЛИ с длиной волны 0,752 мкм коэффициент поглощения поликремния возрастает до значений, лежащих в диапазоне от 2200 до 5000 см<sup>-1</sup> (в зависимости от технологии изготовления). Коэффициент пропускания 0,5 мкм слоя поликремния составит при этом от 0,77 до 0,9, что может потребовать учета при проведении лазерных испытаний. В случае же использования более коротких длин волн поглощение в поликремнии может составить до 85% полной энергии ЛИ (при длине волны 0,53 мкм) и стать источником существенной дополнительной неравномерности ионизации по площади КНС изделий.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что оптимальный диапазон длин волн ЛИ для объемных ионизационных эффектов в КНС (а как следствие и КНИ) микросхемах в общем случае зависит от технологических особенностей изготовления и лежит в пределах от 0,9 до 0,75 мкм.

Применения более коротких длин волн ЛИ для моделирования объемных

ионизационных эффектов в КМОП ИС, выполненных *по объемной технологии*, позволит существенно упростить требования к энергетике ЛИУ, снизить риск повреждения поверхности микросхемы, аналогично показанному выше на примере тонкопленочных микросхем. Однако реализация на практике такого подхода потребовала тщательной оценки влияния роста неравномерности ионизации по глубине испытываемого прибора на адекватность лазерного имитационного моделирования.

С этой целью был проведен численный анализ типичных объемных КМОП тестовых структур и микросхем при воздействии ЛИ с длинами волн от 1,06 мкм до 0,85 мкм с целью определения допустимого диапазона длин волн для адекватного моделирования объемных ионизационных эффектов.

Полученные расчетные зависимости чувствительности тестовой структуры от длины волны ЛИ приведены на рис. 2а. Так как рассматриваемый диапазон длин волн лежит вблизи края основной полосы поглощения кремния коэффициент поглощения ЛИ сильно зависит от длины волны.

Для перехода на более короткие длины волн, необходимо было исследовать влияние роста неравномерности интенсивности ионизации по глубине кристалла на адекватность лазерного имитационного моделирования. Критерием адекватности в данном случае может служить сохранение соотношения мгновенной и запаздывающей составляющих ионизационного тока структуры, поскольку последняя из них формируется в глубине подложки, где сильнее сказывается неравномерность распределения ионизации.

Кроме того, уменьшение вклада запаздывающей составляющей ионизационного тока при уменьшении длины волны ЛИ может привести к ошибке в определении времени восстановления работоспособности структуры после воздействия импульса излучения. На рис. 2б приведены расчетные зависимости

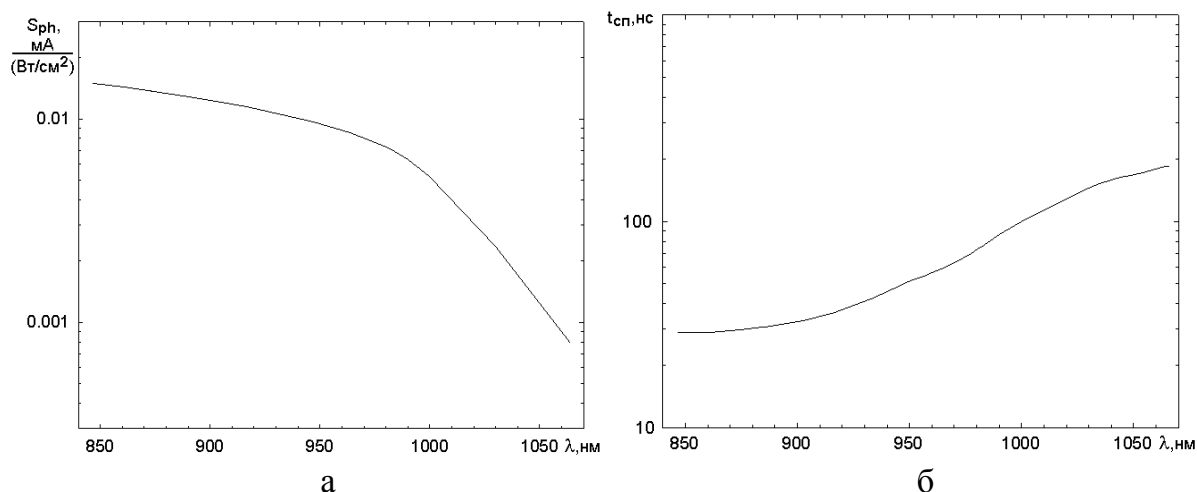


Рис. 2 – Ионизационная чувствительность КМОП тестовой структуры в зависимости от длины волны ЛИ (а) и расчетная зависимость времени спада ионизационного тока тестовой структуры (по уровням 0,1 – 0,9 амплитуды) от длины волны ЛИ (б).



времени спада ионизационного тока тестовой структуры (на уровнях 0,1 – 0,9 амплитуды) от длины волны. Видно, что в диапазоне длин волн от 1,06 до 0,973 мкм уменьшение времени спада не превышает двух раз. Ниже этого диапазона ошибка в определении времени спада тока становится недопустимо большой.

### **Реализация лазерных установок для испытаний полупроводниковых структур на стойкость к мощным импульсным ионизирующим воздействиям**

Необходимость расширения границ лазерного моделирования до мощности поглощенной дозы  $10^{13}$  ед./с потребовала создания новых экспериментальных средств проведения лазерных испытаний при таких уровнях воздействия.

На основании результатов исследований по теме диссертации была разработана и усовершенствована базовая методика лазерных испытаний изделий микроэлектроники на кремниевых и гетероструктурах на стойкость к импульсным ионизирующим воздействиям в диапазоне предельных уровней. Были разработаны базовые требования к составу, функциональным возможностям и параметрам лазерного испытательного комплекса.

Испытательный комплекс должен обеспечивать воздействие импульса ЛИ на кристалл микросхемы, задание и контроль электрического и функционального режимов работы микросхемы, температуры среды, параметров ЛИ, а также определение (контроль) работоспособности (по электрическим параметрам и функционированию) микросхем во время и после воздействия ЛИ.

Источник ЛИ для испытаний микросхем на основе кремниевых структур объемной технологии (монокремниевых, эпитаксиальных, с диэлектрической изоляцией и др. с «глубокими» в 3 мкм и более приборными слоями или карманами) при эффективной длительности импульсов в диапазоне от 7 до 30 нс должен обеспечивать технические характеристики: длина волны ЛИ – в диапазоне от 0,9 до 1,1 мкм; максимальная энергия в импульсе – не менее 40 мДж; диаметр пятна – не менее 6 мм (не менее 50 мм при групповом воздействии на несколько кристаллов в едином электронном устройстве); стабильность (повторяемость) амплитудно-временных характеристик – не менее 20 %; возможность ослабления интенсивности ЛИ — до  $10^5$  раз от максимального значения.

Для испытаний микросхем с тонкими (менее 3 мкм) приборными слоями и карманами на эпитаксиальных, КНС и КНИ гетероструктурах длина волны излучения лазерного имитатора может быть понижена до 0,53 мкм (рекомендуемые значения — в диапазоне от 0,8 до 0,9 мкм) с соответствующим снижением максимальной энергии в импульсе до 1 мДж.

Для формирования однородности интенсивности ЛИ по пятну заданного диаметра необходимо использовать рассеиватели-формирователи (объемно-матированные, оптоволоконные) или телескопические объективы.

Основным рекомендуемым способом облучения при лазерных испытаниях

бескорпусных микросхем, а также микросхем в оптически прозрачных корпусах является облучение с донной стороны кристалла (подложки) микросхемы – «снизу». Для металлокерамических корпусов при посадке кристаллов на клей допускается облучение непосредственно через керамическое основание корпуса с учетом поглощения ЛИ в основании корпуса. Коэффициенты пропорциональности между интенсивностью ЛИ и эквивалентной мощностью поглощенной дозы могут быть получены экспериментально по результатам калибровочных испытаний изделий на МУ и ЛИУ в одинаковых температурных условиях, или расчетным путем. Если конструктивное исполнение микросхемы или контактирующего устройства не допускает облучения «снизу», то применяют облучение «сверху» (с поверхностной стороны кристалла), предварительно удаляя крышку корпуса.

В ходе диссертационной работы ЛИУ «РАДОН-5ЕМ» была дооснащена высокоэффективным (около 20%) преобразователем длины волны ЛИ во вторую гармонику (0,53 мкм) (*модификация «РАДОН-5ЕМ2»*), что позволило обеспечить в тонких приборных слоях КНИ значения эквивалентной мощности поглощенной дозы до  $10^{13}$  ед./с.

С целью повышения мощности воздействия при участии автора была разработана малогабаритная переносная ЛИУ «РАДОН-7», обладающая повышенной по сравнению с традиционным ЛИУ по типу «РАДОН-5» выходной энергией на длине волны 1064 нм (не менее, чем в два раза). Особенностью данной ЛИУ является использование в качестве источника излучения импульсного наносекундного лазера с пассивной модуляцией добротности, что позволило поднять выходную энергию в импульсе до 100 мДж и снизить электромагнитные помехи и наводки, влияющие на процесс регистрации ионизационного отклика.

Для исследования радиационных откликов полупроводниковых структур ЭКБ в максимально широком диапазоне эквивалентных уровней мощности дозы была разработана оригинальная ЛИУ «РАДОН-8» (см. рис. 3), включающая в себя импульсный наносекундный лазерный источник с модулированной добротностью, работающий на длинах волн 1,06 и 0,53, а также дополнительный блок перестройки длины волны ЛИ в диапазоне 0,7...1 мкм. ЛИУ имеет сравнительно малогабаритную конструкцию, позволяющую максимально просто перестраивать длину волны и варьировать в широких пределах энергию ЛИ с возможностью ее контроля для каждого импульса, воздействующего на исследуемую ИС, а также изменять другие параметры ЛИ, такие, как диаметр или расходимость пучка.

На выходе лазерного излучателя установлен блок удвоителя частоты на нелинейном кристалле КТР, осуществляющий преобразование основного излучения с длиной волны 1,06 мкм во вторую гармонику 0,53 мкм. Далее ЛИ может быть направлено в два канала: в канал основного излучения (I), используемый при работе с длинами волн 1,06 и 0,53 мкм, либо в канал перестройки длины волны (II).

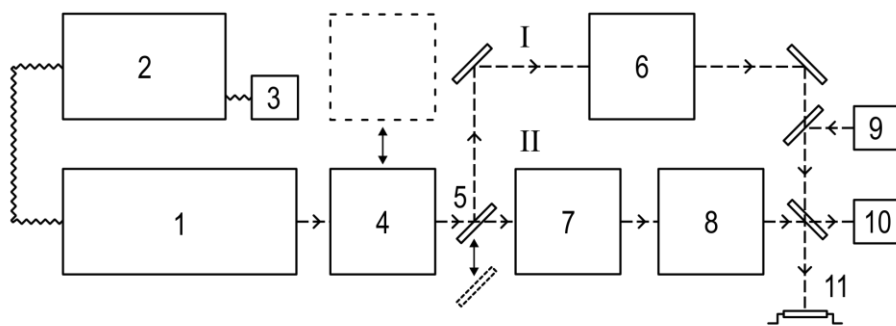


Рис. 3 – Блок-схема лазерной имитационной установки «РАДОН-8».

1 – лазерный излучатель; 2 – стойка питания; 3 – пульт управления; 4 – блок удвоителя частоты; 5 – селектор каналов; 6,8 – блок формирователя лазерного пучка; 7 – перестраиваемый лазер; 9 – указатель центра пучка; 10 – блок контроля энергии лазерного импульса; 11 – исследуемый объект

На основе оригинальной малогабаритной модификации ЛИУ «Радон-8Н» при участии автора был также разработан и создан опытный образец аппаратно-программного комплекса контроля сбоеустойчивости ОЗУ ЛАПК-0501, предназначенного для моделирования объемных ионизационных эффектов в КМОП объемных и КНС ИС при эквивалентном воздействии специальных факторов с характеристиками 7.И6(7.И8) и использования ЛИ в технологическом процессе изготовления КМОП объемных и КНС ИС.

Комплекс ЛАПК-0501 обеспечивает воздействие импульса ЛИ на ИС, задание требуемого режима ее функционирования в момент воздействия, возможность записи различных тестовых кодов в накопитель, считывания и сравнения записанных и считанных данных, контроль параметров ЛИ при каждом воздействии. Структурная схема стенда ЛАПК-0501 представлена на рис. 4.

В состав стенда входят: ЛИУ «РАДОН-8Н» (лазерный излучатель (1) с источником питания (2), формирователь пучка (3), блок контроля энергии ЛИ БКЛИ-201 (4)) аппаратно-программный испытательный комплекс АПИК-0501 (блок согласования и коммутации БСК-0401А (6) с платой расширителя ПИО (5), персональный компьютер с платой ввода-вывода логических сигналов УПА-0401 и платой ввода-вывода аналоговых сигналов БИСХ-0401 (8), цифровой регистратор импульсов напряжения TDS-1012 (7), источник питания GPS-4303 (9).

Отличительной особенностью «РАДОН-8Н» является сконструированный в виде единого малогабаритного блока ослабитель-формирователь лазерного пучка. В качестве основного источника ЛИ на длинах волн 1,06 и 0,53 мкм используется лазерный излучатель, по характеристикам аналогичный использованному в базовой модели «РАДОН-8».

Комплекс ЛАПК-0501 был внедрен в ФГУП ФНПЦ «НИИИС» им. Ю.Е. Седакова для радиационной отбраковки микросхем спецстойкого статического ОЗУ типа 1620РУ6Н2НИ к воздействию фактора 7И6 (7.И8) по ГОСТ РВ 20.39.414.2 по параметру «сохранность информации» с использованием

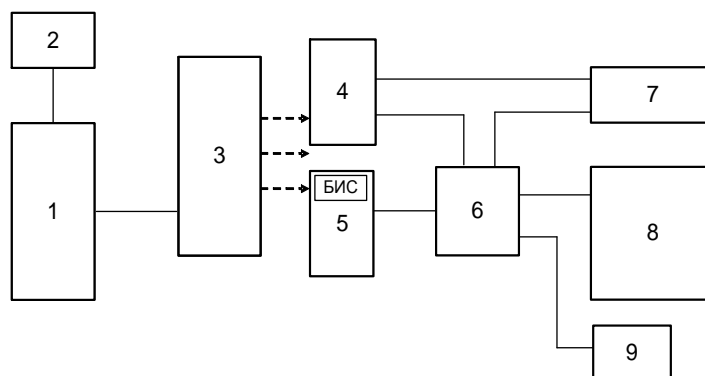


Рис. 4 – Структурная схема ЛАПК-0501 для радиационной отбраковки ИС ОЗУ.

импульсного ЛИ. На способ отбраковки ИС ОЗУ по уровню бессбойной работы с использованием лазерного источника наносекундных импульсов получен патент RU 2371731 С1.

Основные технические характеристики разработанных и модифицированных автором ЛИУ сведены в табл. 1.

Табл. 1. Технические характеристики ЛИУ

Параметр	«РАДОН-5ЕМ2»	«РАДОН-7»	«РАДОН-8»	
			канал I	канал II
Длина волны ЛИ, мкм	1,064/0,53	1,064/0,53	1,064/0,53	0,7...1,0
Энергия в имп., мДж	40/10	100/30	150/70	30
Длительность имп., нс	7	12	12	10
Макс. частота имп., Гц	0,25	1	10	10
Диаметр пятна ЛИ, мм	3...25	5...30	6...36	3...35

**Результаты экспериментальной апробации разработанных методических и технических средств лазерных имитационных испытаний в диапазоне предельных мощностей дозы**

Для практической апробации результатов численных расчетов, представленных выше, проводились экспериментальные исследования ионизационной реакции тестовых структур и выбранных изделий ЭКБ с использованием разработанных автором испытательных комплексов. В качестве источников ЛИ на длинах волн 1,08 и 0,54 мкм использовался модернизированный вариант ЛИУ «РАДОН-5ЕМ2», а на длинах волн 1,06, 0,53 мкм и в диапазоне 0,7...1,0 мкм – ЛИУ «РАДОН-8».

С целью сравнительного анализа возможности и эффективности использования второй гармоники ЛИ определены экспериментальные зависимости ионизационной реакции тестовых КНС МОП-транзисторов (МОПТ) от

интенсивности лазерного воздействия на первой и второй гармониках ЛИ (см. рис. 5). Экспериментально наблюдаемый выигрыш составляет около 60-70 раз, что обусловлено дополнительным поглощением излучения в поликремниевом затворе структур. При этом формы ионизационных токов практически совпадают, как при высоких, так и при низких уровнях воздействия ЛИ. Это дает возможность провести калибровку эквивалентной мощности дозы, создаваемой излучения 2-ой гармоники по амплитуде ионизационного тока от 1-ой гармоники. В режиме облучения «сверху» для КНС-структур данного типа получилось значение коэффициента преобразования интенсивности ЛИ 2-ой гармоники в эквивалентную мощность дозы порядка  $10^8$  (ед./с)/(Вт/см<sup>2</sup>).

В классе более сложных КНС изделий была исследована БИС *статического* ОЗУ 1620РУ5 емкостью 4Кб. Было обнаружено, что зависимости числа сбившихся ячеек памяти БИС ОЗУ 1620РУ5 от эквивалентной мощности дозы, создаваемой ЛИ 1-ой и 2-ой гармоник практически совпадают. Однако, для данного типа ОЗУ было получено более низкое значение коэффициента преобразования интенсивности ЛИ 2-ой гармоники в эквивалентную мощность дозы  $K_i \cong 8 \cdot 10^6$  (ед./с)/(Вт/см<sup>2</sup>) по сравнению с простыми тестовыми транзисторами. Связано это с тем, что с увеличением сложности изделий возрастают потери энергии ЛИ вследствие поглощения в многослойной металлизации и поликремниевых областях.

При использовании ЛИ с длиной волны 700...920 нм (ЛИУ «РАДОН-8») было установлено, что уже при длине волны ЛИ 0,9 мкм обеспечивается близкий к предельному (по длине волны) уровень ионизационного тока цепи питания

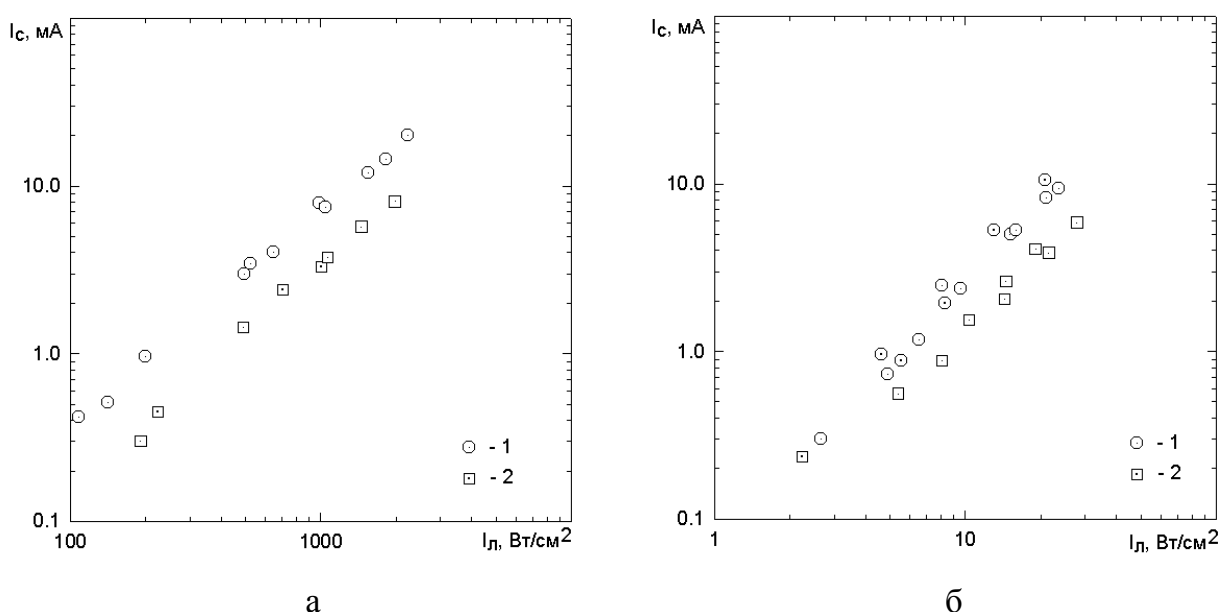


Рис. 5 – Экспериментальные значения амплитуд ионизационных токов КНС р-МОП (1) и n-МОП (2) тестовых транзисторов в зависимости от интенсивности ЛИ с длинами волн 1,06 (а) и 0,53 (б) мкм.

(см. рис. 6).

При воздействии ЛИ с длиной волны 0,752 мкм и интенсивностью  $2,3 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>, удалось получить максимальную эквивалентную мощность дозы составляющую  $3,7 \cdot 10^{13}$  ед./с. Причем такая высокая эквивалентная мощность дозы получена при относительно невысокой интенсивности ЛИ, которая не вызывает повреждения и деградации параметров КМОП КНС-инверторов в ходе экспериментов.

Был также проведен ряд экспериментов по исследованию ионизационной реакции *объемных* КМОП структур и ИС. Измеренная зависимость ионизационной чувствительности (по току в цепи питания) тестовых диодных структур от длины волны представлена на рис. 7. Эксперимент подтверждает возможность увеличения эффективности использования ЛИ при уменьшении длины волны и для структур объемной технологии. При этом в диапазоне длин волн от 1,06 до 0,973 мкм форма ионизационного тока еще не слишком сильно искажается (за счет дополнительной неравномерности распределения ионизации по глубине). Полученное для тестовой диодной структуры преимущество в эффективности ионизации на длине волны 0,973 мкм по сравнению с 1,06 мкм составило около 7 раз.

Для тестового КМОП-инвертора была определена экспериментальная зависимость чувствительности тока питания  $\Delta I_{cc}/I_1$  от длины волны ЛИ (рис. 8). Диапазон длин волн, в пределах которого сохраняется адекватность лазерного имитационного моделирования, оказался несколько уже, чем в случае тестовых диодных структур и составил от 1,06 до 0,988 мкм. Экспериментально полученные зависимости времени спада ионизационного тока цепи питания от длины волны приведены на рис. 9. Видно, что в диапазоне длин волн от 1,06 до 0,988 мкм

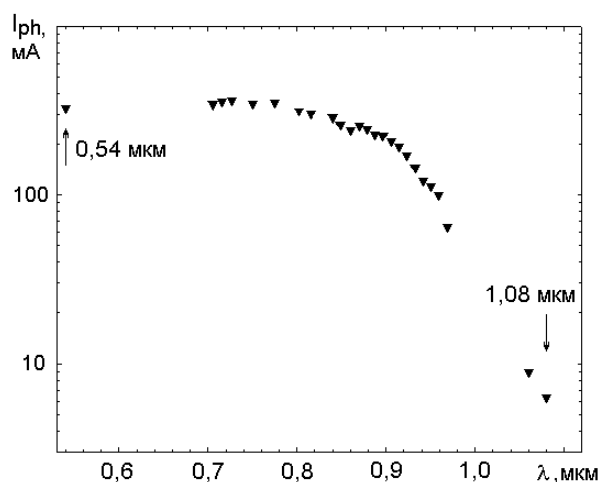


Рис. 6 – Экспериментальные зависимости амплитуды тока цепи питания КНС БИС ОЗУ от длины волны ЛИ при интенсивности ЛИ  $8 \cdot 10^3$  Вт/см<sup>2</sup>.

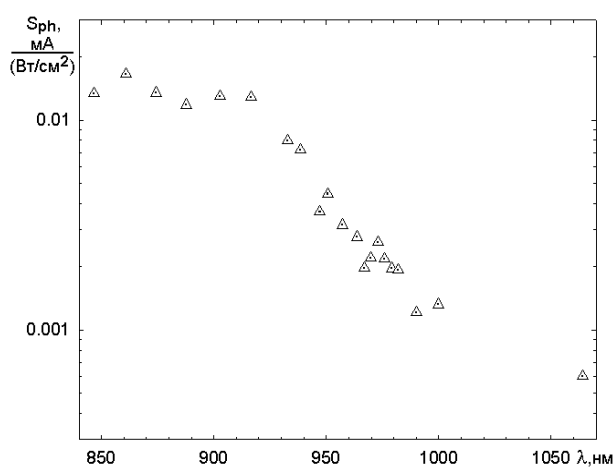


Рис. 7 – Экспериментальная зависимость ионизационной чувствительности тестовых диодных структур объемной КМОП-технологии от длины волны ЛИ.

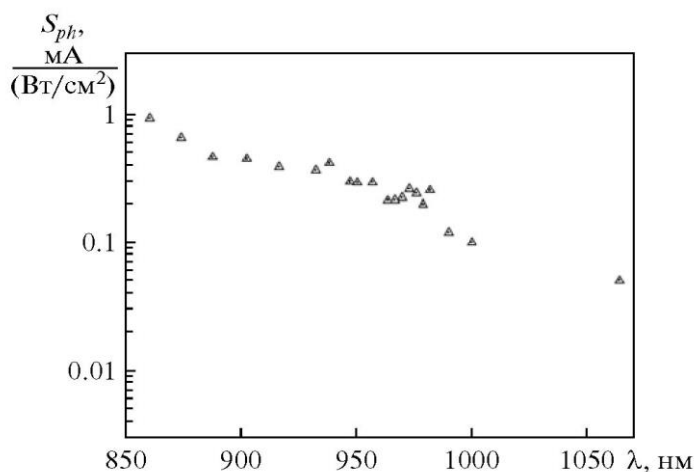


Рис. 8 – Экспериментально полученные зависимости ионизационной чувствительности тестового КМОП-инвертора от длины волны ЛИ.

уменьшение времени спада составляет не более двух раз.

Определенная экспериментальная зависимость времени потери работоспособности (ВПР) тестового КМОП-инвертора по уровню выходного напряжения лог. «1» приведены на рис. 10. Эти результаты аппроксимируются линейной регрессией 1-го порядка. При задании требований к точности определения ВПР на уровне 30% рабочий интервал длин волн ЛИ составляет от 1,06 до 0,97 мкм. Полученное в этом случае преимущество в эффективности ионизации составляет около 5 раз.

Проведенные экспериментальные исследования влияния когерентности и состояния поляризации ЛИ на результаты лазерных имитационных испытаний на примере КМОП ИС ОЗУ 1635РУ1Т позволяют сделать вывод о том, что ионизационная реакция и порог сбоев существенно не зависят от когерентности и состояния поляризации падающего ЛИ.

Проведенные экспериментальные исследования не выявили возникновения

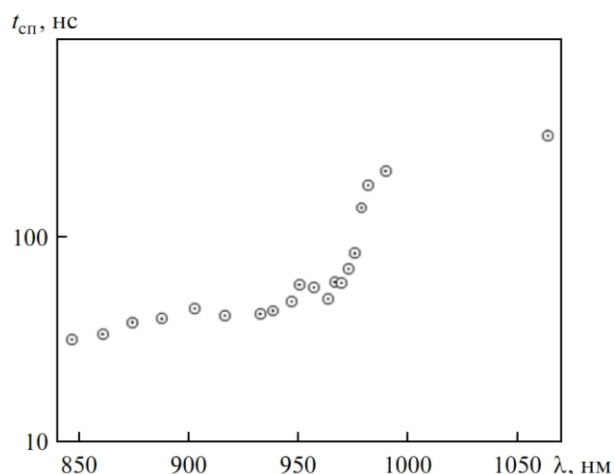


Рис. 9 – Экспериментальные зависимости времени спада ионизационного тока цепи питания тестового КМОП-инвертора от длины волны ЛИ.

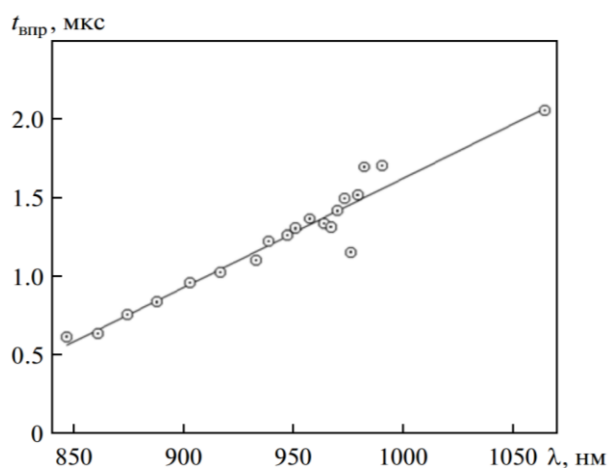


Рис. 10 – Экспериментальные зависимости ВПР тестового КМОП-инвертора по уровню выходного напряжения лог «1» от длины волны ЛИ.

катастрофических отказов (КО) КМОП ИС ОЗУ 1635РУ1Т при облучении лазерным пучком диаметром 12 мм (покрывающим весь кристалл) вплоть до максимально достижимых эквивалентных уровней воздействия ( $4,3 \cdot 10^{12}$  ед./с). При переходе на диаметр пятна излучения 6 мм (неполное облучение кристалла ИС) КО наблюдались при эквивалентном уровне воздействия свыше  $8,6 \cdot 10^{12}$  ед./с.

Наиболее полная экспериментальная апробация разработанных в диссертации методических подходов и испытательных средств была проведена в ходе их практического использования для проведения радиационных испытаний более ста типов изделий ЭКБ, проведенных в ИЭПЭ НИЯУ МИФИ, АО «ЭНПО СПЭЛС», ФГУП ФНПЦ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова», АО «НИИМЭ и Микрон», ГНЦ НПК «Технологический центр МИЭТ» и ряде других предприятий (имеются акты внедрения).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной результат диссертации заключается в решении актуальной научно-технической задачи разработки и развития лазерных методов и средств моделирования эффектов импульсных ионизирующих воздействий с предельными уровнями (до  $10^{13}$  ед./с) в современных изделиях радиационно-стойкой ЭКБ для бортовых устройств вычислительной техники и систем управления ракетных и ядерных комплексов.

**Основные научные (теоретические) результаты** диссертации заключаются в следующем:

1. Проведено физико-математическое моделирование объемной ионизационной реакции полупроводниковых элементов при предельных уровнях воздействия в диапазоне  $10^{12} \dots 10^{13}$  ед./с и показано, что ионизационная реакция полупроводниковых структур ЭКБ имеет существенно неоднородный и нелинейный характер ионизационных процессов. Нелинейная ионизационная реакция обусловлена, в первую очередь, откликом самой электронной схемы (переходом в режим ограничения большинства элементов, отпиранием изолирующих р-п переходов, модуляцией проводимости и т.п.), приводя к увеличению времени восстановления после ИИВ.

2. Проведено обоснование возможности моделирования оптическим излучением в диапазоне длин волн 1,06...1,08 мкм объемных ионизационных эффектов при эквивалентных уровнях воздействия  $10^{12} \dots 10^{13}$  ед./с и выявлено, что в большинстве случаев линейная связь между эквивалентной мощностью дозы и энергией ЛИ применима лишь в диапазоне до  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup> (до  $10^{12}$  ед./с). Показано, что в диапазоне требуемых эквивалентных мощностей поглощенных доз (до  $10^{13}$  ед./с) необходимо учитывать зависимость коэффициента поглощения излучения от концентрации неравновесных носителей заряда, а также влияние Оже-рекомбинации на время жизни носителей. Проведенный анализ позволил определить условия эквивалентности лазерного и высокоэнергетического ИИВ в



диапазоне интенсивностей ЛИ до эквивалентных мощностей поглощенных доз  $10^{13}$  ед./с.

3. Установлено, что для достижения эквивалентной мощности поглощенной дозы свыше  $10^{12}$  ед./с в СБИС с большими размерами кристаллов и многослойной металлизацией необходимо использовать более короткие длины волн ЛИ. Использование второй гармоники ЛИ (0,53...0,54 мкм) позволяет существенно снизить требования к энергии импульса ЛИ, что даст возможность обеспечить эквивалентную мощность в кремниевых ИС до  $10^{13}$  ед./с без повышения энергии импульса. Основным недостатком данного метода является сильная неравномерность распределения ионизации по глубине полупроводника, что позволяет рекомендовать использование ЛИ второй гармоники, прежде всего, для тонкопленочных КНИ и КНС приборов.

4. Обосновано теоретически и продемонстрировано экспериментально, что оптимальный диапазон длин волн ЛИ для моделирования объемных ионизационных эффектов в тонкопленочных КНИ и КНС КМОП ИС в общем случае зависит от технологических особенностей изготовления и лежит в пределах от 0.9 до 0.75 мкм. Для КМОП ИС объемной технологии показано, что при уменьшении длины волны от 1064 до 970 нм повышение неоднородности ионизации кремния по глубине подложки может привести к незначительному уменьшению измеряемого ВПР. При этом измеренное экспериментально преимущество в эффективности использования энергии ЛИ составляет около 5 раз. Такой подход может быть использован для снижения энергии излучения ЛИУ при необходимости проведения испытаний во всем диапазоне требований нормативных документов. При дальнейшем уменьшении длины волны ЛИ (до уровня 900 нм) наблюдается серьезное нарушение адекватности лазерного имитационного моделирования объемных ионизационных эффектов в КМОП-микросхемах, выполненных по объемной технологии.

5. Показано, что во всем диапазоне эквивалентных уровней воздействия до  $10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup> полупроводниковые приборы на основе кремния не испытывают существенных дополнительных температурных и механических напряжений, способных повлиять на показатели стойкости испытываемых изделий и вызвать их механическое разрушение.

**Основной практический результат** диссертации заключается в разработке, создании, аттестации и внедрении в ОАО «ЭНПО СПЭЛС», ЦФТИ МО, ФГУП ФНПЦ «НИИИС» ряда экспериментальных комплексов на основе оригинальных лазерных установок «РАДОН-7», «РАДОН-8», «РАДОН-8Н», «РАДОН-8М», обеспечивающих возможность проведения испытаний СБИС на стойкость импульсным ионизирующим воздействиям с эквивалентным уровнем мощности дозы до  $10^{13}$  ед./с.

Таким образом, в ходе работы над диссертацией достигнута ее основная

**цель**, а именно: создан инструментарий для испытаний ЭКБ на кремниевых и гетероструктурах на радиационную стойкость при импульсном ионизирующем воздействии с предельной эквивалентной мощностью дозы (до  $10^{13}$  ед./с) на основе развитых лазерных методов моделирования доминирующих ионизационных эффектов и созданного оригинального экспериментального комплекса, обеспечивающего рациональное сочетание достоверности, доступности, технико-экономической эффективности и экологической безопасности испытаний.

#### **Список основных работ, опубликованных по теме диссертации**

1. Nikiforov A.Y., Mavritsky O.B., Egorov A.N., Figuero V.S., Telets V.A., Skorobogatov P.K., Polevich S.A. RADON-5E” Portable Pulsed Laser Simulator: Description, Qualification Technique and Results, Dosimetry Procedure // Proceedings of the 1996 IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW), pp. 49-54 (1996).
2. Nikiforov A.Y., Mavritsky O.B., Egorov A.N., Chumakov A.I. Upgrade Design Versions of RADON-5EM Laser Simulator // Proceedings of the IEEE 4th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), pp. 300-304 (1998).
3. Egorov A.N., Lebedev S.V. Magneto-Optical Observation of the Latchup Effect in CMOS ICs Induced by Uniform and Local Irradiation // Journal of Applied Physics, 91(10), pp. 7006-7007 (2002).
4. А.И. Чумаков, А.Ю. Никифоров, А.Н. Егоров и др. Развитие лазерных имитационных методов для исследования объёмных ионизационных эффектов // Вопросы атомной науки и техники, сер. Физика радиационного воздействия на РЭА, 1999, Вып. 3-4, С. 142-145.
5. Нечаев А.В., Маврицкий О.Б., Егоров А.Н., Скоробогатов П.К. Исследование ионизационной реакции полупроводниковых структур при воздействии лазерного излучения в диапазоне длин волн 850-1064 нм // Известия Российской академии наук, сер. физическая, 2006, Т. 70, № 9, С. 1310-1314.
6. А.Ю. Никифоров, А.И. Чумаков, П.К. Скоробогатов, А.Н. Егоров и др. Лазерный имитатор ионизирующих излучений «РАДОН-8» на основе твердотельного  $Al_2O_3:Ti^{3+}$  лазера с перестройкой длины волны // В сб.: Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость-2006». М.: МИФИ, 2006, Вып. 9, С. 211-212.
7. Скоробогатов П.К., Киргизова А.В., Петров А.Г., Егоров А.Н. Выбор оптимальных параметров лазерного излучения для моделирования переходных ионизационных эффектов в КМОП КНС БИС ОЗУ // В сб.: Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость-2006». М.: МИФИ, 2006, Вып. 9, С. 179–180.
8. Антипов В.И., Синегубко Л.А., Киселев Н.Н., Маслов В.В., Яшанин И.Б., Скобелев А.В., Никифоров А.Ю., Скоробогатов П.К., Киргизова А.В.,

- Маврицкий О.Б., Егоров А.Н., Телец В.А. Способ разбраковки микросхем оперативного запоминающего устройства по уровню бессбойной работы // патент на изобретение RU 2371731 С1 от 07.04.2008.
9. А.Н. Егоров, А.И. Чумаков, О.Б. Маврицкий, А.А. Печенкин, А.В. Яненко. Особенности возникновения катастрофических отказов в КМОП БИС при лазерном облучении // В сб.: Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость-2008». М.: МИФИ, 2008, Вып. 11, С. 95-96.
  10. А.Н. Егоров. Состояние и перспективы развития лазерных имитаторов. // Труды Российской научной конференции «Радиационная стойкость электронных систем» – «Стойкость-2008».
  11. A.N. Egorov, A.I. Chumakov, O.B. Mavritskiy, A.A. Pechenkin, D.O. Koltsov, A.V. Yanenko. "PICO-4" Single Event Effects Evaluation and Testing Facility Based on Wavelength Tunable Picosecond Laser // IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW) Record, pp. 69-72 (2012).
  12. А.Н. Егоров, О.Б. Маврицкий. «РАДОН-8М» – лазерный имитатор с переменной длиной волны излучения для исследования эффектов мощности дозы в полупроводниковой ЭКБ. // В сб.: Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость-2013». М.: МИФИ, 2013, Вып. 16, С. 213-214.
  13. Никифоров А.Ю., Скоробогатов П.К., Егоров А.Н., Громов Д.В. Выбор оптимальных параметров лазерного излучения для моделирования ионизационных эффектов в кремниевых микросхемах объемной технологии // Микроэлектроника, 2014, Т. 43, № 2, С. 127-132.
  14. П. К. Скоробогатов, А. Ю. Никифоров, А. Н. Егоров. Выбор оптимальных параметров лазерного излучения для моделирования объемных ионизационных эффектов в тонкопленочных кремниевых микросхемах // Микроэлектроника, 2015, Т. 44, № 1, с. 1–14.
  15. A.N. Egorov, A.I. Chumakov, O.B. Mavritskiy, A.A. Pechenkin, D.V. Savchenkov, V.A. Telets, A.V. Yanenko. Femtosecond Laser Simulation Facility for SEE IC Testing // IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW) Record, pp. 247-250 (2014).
  16. A.V. Gordienko, O.B. Mavritskii, A.N. Egorov, A.A. Pechenkin, D.V. Savchenkov. Correlation of the ionisation response at selected points of IC sensitive regions with SEE sensitivity parameters under pulsed laser irradiation // Quantum Electronics, 44 (12), pp. 1173-1178 (2014).