

На правах рукописи
УДК 621.38; 621.3.049.77; 544.032.65

Маврицкий Олег Борисович

**ТЕХНИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ПРОВЕДЕНИЯ
ЛАЗЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ИЗДЕЛИЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ
ЭЛЕКТРОНИКИ НА СТОЙКОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ
ТЯЖЁЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ**

05.13.05 - Элементы и устройства вычислительной техники
и систем управления

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:



Москва – 2018 г.

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ».

Научный руководитель: **Чумаков Александр Иннокентьевич**,
доктор технических наук, профессор кафедры
«Электроника» Национального исследовательского
ядерного университета «МИФИ»

Научный консультант: **Яненко Андрей Викторович**,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроника» Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»

Официальные оппоненты: **Зольников Владимир Константинович**,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Вычислительная техника и информационные системы» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова»

Селецкий Андрей Валерьевич,
кандидат технических наук, старший научный сотрудник АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники»

Ведущая организация: ФГКУ «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства Обороны РФ.

Защита состоится «28» июня 2018 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.13 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 Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» и на сайте <http://ods.mephi.ru>

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

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

Ученый секретарь
диссертационного совета, к. т. н.

Д.С. Веселов

Общая характеристика работы

Диссертация направлена на решение актуальной научно-технической задачи по разработке технических и методических средств проведения лазерных испытаний на стойкость к воздействию тяжёлых заряженных частиц (ТЗЧ) космического пространства (КП) изделий полупроводниковой электроники (ИПЭ) (интегральных схем (ИС), полупроводниковых приборов, изделий твердотельной СВЧ-электроники, оптоэлектроники и микросистемной техники, а также электронных модулей, реализованных на элементно-технологических базисах и по технологическим процессам микроэлектроники), применяемых в вычислительной технике (ВТ) и системах управления (СУ).

Актуальность темы диссертации обусловлена тем, что ТЗЧ, являясь неотъемлемой частью ионизирующего излучения, в последние годы привлекают к себе повышенное внимание специалистов, занимающихся проблемами радиационной стойкости ИПЭ, используемых в устройствах ВТ и СУ, предназначенных для космических применений и эксплуатируемых как в аппаратуре наземного базирования, так и непосредственно в околоземном КП.

Долгое время космические аппараты отличались высочайшей степенью качества и надежности работы бортовых систем в условиях воздействия различных факторов КП. В последние несколько лет участились случаи нештатного функционирования электронной бортовой аппаратуры, анализ которых привел к выводам, что подобное поведение в основном обусловлено эффектами воздействия ТЗЧ, которые стали проявляться в ИПЭ, выполненных по субмикронным и меньшим проектным нормам. Поэтому задача оценки уровней и обеспечения радиационной стойкости электронных компонент, особенно микросхем повышенной степени интеграции, предназначенных для эксплуатации в условиях КП, сегодня особенно актуальна.

Классическим средством для оценки стойкости отдельных элементов и модулей электронных устройств ВТ и СУ к воздействию ТЗЧ КП являются ускорители ионов и протонов. Однако количество изделий, для которых необходимы комплексные испытания, выросло настолько, что имеющихся мощностей ускорителей ионов и протонов уже недостаточно для удовлетворения возрастающих потребностей в проведении соответствующих измерений в силу их трудоемкости, растянутости по срокам и высокой стоимости. К тому же, при отработке технических решений по повышению устойчивости к сбоям и отказам электронной аппаратуры космических аппаратов источники ионов оказывались малоэффективными, а в ряде случаев и неприменимыми.

Имевшийся к началу работы над диссертацией научно-технический задел и накопленный практический опыт использования лазерных ультракоротких импульсов для моделирования эффектов в ИС, возникающих при пролете ТЗЧ, позволил автору рассматривать специализированные лазерные стенды как мощное самостоятельное техническое средство оценки радиационной стойкости ИПЭ, способное взять на себя

значительную часть нагрузки по испытаниям. При этом наиболее эффективным представляется применение лазерных установок совместно с ускорителями ионов, используемых для калибровочных измерений, необходимых для получения количественных оценок параметров радиационной стойкости ИС по результатам лазерных испытаний. Такой комплексный подход может снять ряд ограничений, характерных для испытаний на короткопробежных ионах, таких как невозможность обеспечить исследование ИС, покрытых защитными компаундами, или ИС с перевернутым кристаллом (выполненных по технологии Flip-Chip). Более того, методы, основанные на применении сфокусированного лазерного излучения (ЛИ) пикосекундной длительности, благодаря высокому пространственному и временному разрешению, позволяют получить принципиально новые возможности:

- локализовать чувствительные элементы с микронной точностью;
- изучать динамическую чувствительность к воздействию ТЗЧ в различных режимах работы ИС;
- многократно воспроизводить локальную ионизацию в объеме полупроводника в заранее определённых чувствительных областях ИС конкретного типа, не вызывая при этом остаточных повреждений ИС.

Для современных испытательных аппаратно-технических комплексов, как и для другой техники специального назначения, характерен принцип модульности. В основу проектирования большинства таких модулей целесообразно закладывать основной принцип: перенос функциональной нагрузки с механических узлов к интеллектуальным (электронным, компьютерно-информационным) компонентам, которые легко перепрограммируются под новые задачи и сегодня относительно недороги по сравнению с компонентами точной механики.

Таким образом, разработка и создание современных средств проведения лазерных испытаний на базе самостоятельных модулей с параметрами, отвечающими требованиям современного уровня развития отечественной и зарубежной ЭКБ, представляет собой актуальную задачу.

Состояние исследований по проблеме

Анализ зарубежных публикаций последних двадцати лет свидетельствует о постоянном развитии существующих и появлении новых технических средств проведения испытаний, а также о признании эффективности лазерных методов испытаний на стойкость к ТЗЧ. Подробный обзор последних достижений в этой области опубликован в 2013 году в работе S. Buchner, F. Miller, V. Pouget и D. McMorrow. Принципиальная возможность применения облучения ультракороткими лазерными импульсами для имитации эффектов от воздействия ТЗЧ на ИПЭ была показана в работах д.т.н. А.И. Чумакова, д.т.н. А.Ю. Никифорова, к.т.н. А.Н. Егорова, к.т.н. А.А. Печенкина, к.т.н. А.В. Яненко.

За время работы над решением задач, положенных в основу диссертации, начиная с 1994 г., были разработаны лазерные установки первого поколения, опыт про-

должительной эксплуатации которых позволил выявить их основные недостатки и определить пути дальнейшего совершенствования аппаратуры, предназначенной для исследования стойкости ИС к воздействию ТЗЧ с помощью импульсного ЛИ. Стало ясно, что наиболее адекватно моделировать воздействие ТЗЧ на ИС удастся при использовании сфокусированного ЛИ пикосекундной длительности. Исследования в области взаимодействия ЛИ с полупроводниковыми материалами и приборами на их основе, выполненные на существующих лабораторных установках, показали возможность и положили начало их использованию для проведения испытаний ИС на радиационную стойкость. Однако результаты, получаемые лазерными методами, долгое время рассматривались как весьма полезные, но лишь дополнительные данные к результатам научно-исследовательских работ. Причиной этому была проблема правильного сопоставления энергии ЛИ с линейными потерями энергии (ЛПЭ) ионов. Разработка методик коррекции результатов лазерных испытаний по калибровочным измерениям на ускорителях и постоянное совершенствование методик самого лазерного импульсного облучения позволяет в настоящее время утверждать, что, в силу упомянутых выше преимуществ, лазерное тестирование становится одним из основных методов прогнозирования возникновения одиночных радиационных эффектов (ОРЭ) в ИПЭ. Поэтому задача совершенствования технических средств лазерных испытаний и оптимизации применяемых методик стала рассматриваться как путь к обеспечению заданных требований по радиационной стойкости ИПЭ, используемых в космическом приборостроении.

Целью диссертации является разработка и создание технических и методических средств проведения испытаний ИПЭ, применяемых в ВТ и СУ космических аппаратов, на стойкость к воздействию ТЗЧ на основе лазерных установок ультракороткой длительности со сфокусированным излучением.

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

- обоснование возможности применения импульсов сфокусированного ЛИ ультракороткой длительности для экспериментального моделирования ОРЭ в ИПЭ и формирование требований к характеристикам импульсов ЛИ;
- научно-техническое обоснование состава и разработка базовой модульной схемы лазерного испытательного стенда для исследования стойкости ИС к воздействию ТЗЧ по ОРЭ на основе анализа существующих зарубежных и отечественных технических средств;
- разработка и создание лазерных испытательных комплексов, включающих в свой состав источники пикосекундных лазерных импульсов с фиксированными длинами волн и перестраиваемой длиной волны, системы фокусировки и позиционирования объекта, систему управления параметрами лазерных импульсов;
- разработка научно-методических средств по измерению параметров и аттестации лазерных испытательных комплексов;
- разработка научно-методического обеспечения по проведению эксперимен-

тальных исследований и испытаний ИПЭ на лазерных испытательных установках;

- апробация работы созданных лазерных комплексов при проведении реальных испытаний и экспериментальных исследований ИПЭ.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- обоснованы требования к характеристикам ЛИ для исследования ИПЭ с различными технологическими решениями;

- предложена оригинальная базовая модульная схема лазерного испытательного стенда для исследования стойкости ИС к воздействию ТЗЧ по ОРЭ, позволяющая реализовывать установки для испытаний различных типов ИПЭ;

- разработана базовая методика оценки параметров чувствительности ИС к эффектам воздействия ТЗЧ с помощью сфокусированного ЛИ;

- обоснован выбор метода пассивной синхронизации мод для получения пикосекундных импульсов с высокой временной, пространственной и энергетической стабильностью до 1%;

- разработана математическая модель распространения ЛИ в многослойной микроэлектронной структуре с учетом наличия диэлектрических слоев различной толщины при облучении ИС со стороны активного слоя и влияния толщины подложки при облучении со стороны подложки, на основании которой разработана методика расчета корректирующего сдвига плоскости фокусировки относительно поверхности объекта.

Практическая значимость работы:

1. Разработаны при участии автора новые технические средства (РАДОН-9Ф, ПИКО-2, ПИКО-3, ПИКО-4), которые внедрены в практику радиационных испытаний ИПЭ на стойкость к воздействию ТЗЧ. На экспериментальные комплексы ПИКО получены патенты на полезную модель: ПИКО-3 – №110488 и ПИКО-4 – №168496, зарегистрированные в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 20.11.2011 г. и 06.02.2017 г., соответственно.

2. Разработаны при участии автора методики аттестации пикосекундных лазерных испытательных комплексов ПИКО-3 и ПИКО-4, которые используются при первичной и периодической аттестации лазерных экспериментальных комплексов.

3. Проведены сравнительные экспериментальные исследования ряда ИПЭ на оригинальных лазерных комплексах и ускорителях ионов, которые показывают хорошую корреляцию полученных параметров радиационной стойкости.

4. Результаты диссертации вошли в отчетные материалы по НИР и составным частям ОКР («Остров», «Контроль-РД», «Информация-РС», «Микро-Д», «РАД-ИКВ» и др), выполненных в интересах Минобороны РФ, Минпромторга РФ, Росатома, предприятий Роскосмоса и оборонного комплекса. На лазерных комплексах РАДОН-9Ф, ПИКО-3 и ПИКО-4 проведены испытания более 200 различных типов микросхем.

5. Изложенные в диссертации результаты легли в основу нормативного документа РД В 319.03.24 «Методы испытаний и оценки стойкости больших и сверхбольших

интегральных схем к одиночным сбоям от воздействия отдельных высокоэнергетич-
ных тяжелых заряженных частиц и протонов космического пространства».

Положения, выносимые на защиту:

1. Требования к параметрам импульсов ЛИ для моделирования ОРЭ в ИПЭ.
2. Требования к составу и основным параметрам модулей лазерного испытатель-
ного оборудования для оценки стойкости ИС к воздействию ТЗЧ по ОРЭ, позволяю-
щие реализовывать установки, адаптируемые для испытаний различных ИПЭ.
3. Оригинальные лазерные экспериментальные установки (Радон-9Ф, Пико-3 и
Пико-4) для проведения экспериментальных исследований и испытаний ИПЭ на чув-
ствительность к воздействию ТЗЧ.
4. Базовая методика для оценки параметров чувствительности ИС к эффектам от
воздействия ТЗЧ с помощью сфокусированного ЛИ.
5. Математическая модель распространения ЛИ в многослойной микроэлектрон-
ной структуре для коррекции условий фокусировки на исследуемом объекте с учетом
наличия диэлектрических слоев различной толщины при облучении ИС со стороны
активного слоя и влияния толщины подложки при облучении со стороны подложки.
6. Средства проведения испытаний ИС на основе лазерных комплексов
ПИКО-3 и ПИКО-4.
7. Методики аттестации пикосекундных лазерных испытательных комплексов.

Достоверность научных результатов обеспечивается физической обоснован-
ностью выбора методик решения поставленных задач, использованием многократно
апробированных методов анализа и обработки результатов экспериментальных ис-
следований и их сравнением с теоретическими и экспериментальными результатами
других авторов.

Личный вклад соискателя. Результаты, представленные в работе, получены
соискателем лично, либо при его непосредственном участии.

Апробация работы:

Основные результаты диссертации были представлены и обсуждались на рос-
сийских и международных конференциях, семинарах и выставках: Всероссийская
научно-техническая конференция по радиационной стойкости электронных систем –
«Стойкость» (г. Лыткарино, Россия, 2007-2009 и 2013-2014 гг.); The Conference on
Radiation Effects on Components and Systems – RADECS (Biarritz, France, 2012;
Moscow, Russia, 2015); Thematic Workshop on Laser Testing of Radiation Effects –
RADLAS (Paris, France, 2011, 2013; Montpellier, France, 2017); IEEE Radiation Effects
Data Workshop – REDW (Oxford, UK, 2013); Всероссийская конференция по пробле-
мам разработки перспективных микро - и нанoeлектронных систем – «МЭС» (Мос-
ковская обл., Россия, 2012 и 2014 гг.); Научные сессии НИЯУ МИФИ (г. Москва, Рос-
сия, ежегодно с 2001 по 2012 г.); The International Conference and Industrial Exhibition
on Nuclear and Space Radiation Effects – NSREC (Paris, France, 2014); Industrial Laser,

Laser Source, and Application Conference SPIE-LASE (San-Francisco, USA, 2015, 2018); IV международная конференция «Фотоника и информационная оптика» (Москва, Россия, 2014-2018).

Публикации: Основные положения диссертационной работы изложены в 19 печатных работах, в том числе 15 – в изданиях, индексируемых в Scopus и/или Web of Science и 4 – в изданиях, входящих в перечень ВАК.

Объем и структура диссертации. Диссертация содержит 159 страницы, в том числе 55 рисунков, 16 таблиц, список литературы из 78 наименований и состоит из списка использованных сокращений, введения, четырех глав, заключения, списка литературы, и трех приложений.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение обосновывает актуальность, обозначает цель и задачи диссертационной работы.

Первая глава посвящена основам применения ЛИ для оценки радиационной стойкости ИС при воздействии ТЗЧ. Описаны факторы, способные нарушать нормальное функционирование ИПЭ, выделена роль ТЗЧ. Приведена классификация ОРЭ от воздействия ТЗЧ. Обоснована возможность моделирования с помощью ультракоротких импульсов сфокусированного ЛИ ионизационной реакции (ИР) ИПЭ, возникающей при воздействии ТЗЧ. Обсуждаются сходства и различия в процессах генерации и собирания избыточного заряда в ИС при попадании ТЗЧ и при воздействии импульсом сфокусированного ЛИ. Проводится сравнение с методами, использующими ускорители ионов. Рассматриваются параметры ЛИ, значимые для моделирования ОРЭ в ИПЭ. Излагаются базовые методы оценки параметров чувствительности ИС к эффектам воздействия ТЗЧ с помощью импульсного сфокусированного ЛИ. Дается краткий обзор существующих зарубежных технических средств проведения лазерных испытаний на стойкость к ТЗЧ.

Вторая глава посвящена обоснованию и выработке общих требований к характеристикам отечественных лазерных средств проведения испытаний на стойкость ИПЭ к воздействию ТЗЧ. Обсуждаются критерии выбора параметров ЛИ, применяемого для генерации неравновесных носителей заряда. Формулируются требования к основным характеристикам современных технических средств проведения испытаний ИС на стойкость к воздействию ТЗЧ. Предлагается математическая модель распространения ЛИ в многослойной микроэлектронной структуре при фокусировке на исследуемом элементе в активной области ИС, учитывающая наличие диэлектрических слоев различной толщины при облучении со стороны активного слоя и влияния толщины подложки при облучении со стороны подложки.

В третьей главе анализируются результаты экспериментальных наблюдений сбоя и отказов, накопленные автором на разработанных и созданных им лабораторных лазерных установках первого поколения. Обосновывается базовая структура лазерного комплекса для испытаний ИС на стойкость к воздействию ТЗЧ. Излагается

концепция построения аппаратно-программных испытательных комплексов следующего поколения из интеллектуальных модулей. Подробно рассматриваются все основные модули, в том числе разработанные автором, обсуждается их назначение и критические параметры, влияющие на точность проводимых измерений. Предлагается методика оптимальной настройки модуля плавного ослабления энергии излучения с динамическим диапазоном 10^5 .

Четвертая глава содержит результаты апробации разработанных лазерных комплексов построенных на базе модулей, описанных в предыдущей главе. Представлены результаты измерения основных характеристик комплексов. Обоснована базовая методика для оценки параметров чувствительности ИС к эффектам от воздействия ТЗЧ с помощью сфокусированного ЛИ с последующей коррекцией по калибровочным измерениям на источниках ионов. Приведены экспериментальные результаты проверки точности локализации чувствительных элементов, возможности исследования динамической чувствительности к одиночным сбоям в различных режимах работы ИС. Выявлены параметры, влияющие на точность определения параметров чувствительности ИС по ОРЭ. Процедуры их измерения систематизированы в представленной методике аттестации комплексов. Приведены примеры результатов испытаний ИС, демонстрирующие возможности испытательных комплексов ПИКО-3 и ПИКО-4. Обсуждаются возможные пути дальнейшего развития аппаратных и методических средств проведения испытаний на стойкость ИПЭ к воздействию ТЗЧ.

Заключение обобщает основные теоретические и практические результаты диссертации.

Лазерные методы оценки стойкости изделий полупроводниковой электроники к воздействию тяжелых заряженных частиц

Современные ИПЭ с высокой степенью интеграции, созданные с применением субмикронных технологий высокочувствительны к ОРЭ, вызванному воздействием ТЗЧ. Хотя состав ионизирующего излучения КП весьма разнообразен, статистика показывает, что при воздействии ТЗЧ эффекты возникают в среднем в сотни и более раз чаще, чем вызванные другими причинами. Поэтому оценка этих эффектов крайне важна для разработки методов уменьшения влияния их последствий, на функционирование бортовой электронной аппаратуры.

Оценка вероятности возникновения ОРЭ в ИПЭ в реальных условиях эксплуатации обычно производится по результатам измерения зависимости сечений эффектов от линейных потерь энергии (ЛПЭ) частиц (ТЗЧ или протонов). При взаимодействии ТЗЧ с веществом, в последнем, путем прямой или вторичной ионизации, образуется трек электрон-дырочной плазмы. При скоплении избыточного заряда в локальном чувствительном объеме ИС могут проявляться ОРЭ: **сбои** и **отказы**.

Их разделяют на четыре основных группы (рис. 1): *катастрофические* – сбои в ИС, которые являются устойчивыми и могут приводить к разрушению ИС; *функциональные* – обратимые эффекты, когда не происходит физического повреждения ИС;

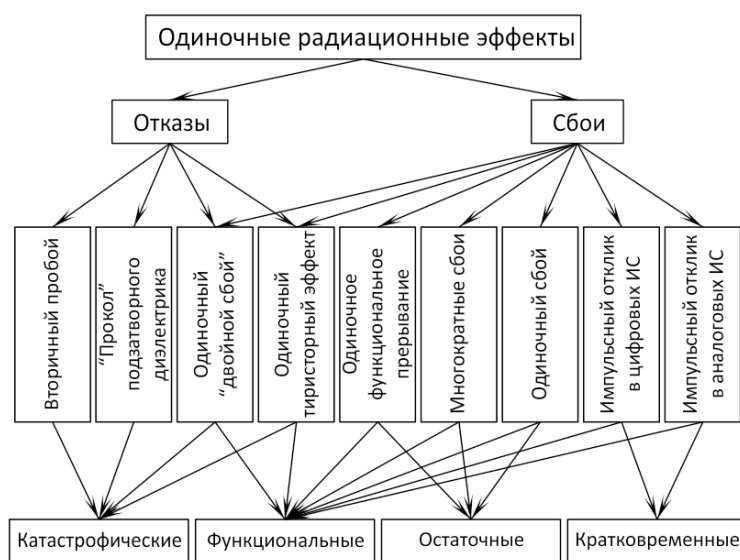


Рис. 1 – ОРЭ от воздействия ТЗЧ

различия воздействий ТЗЧ и сфокусированного ЛИ на полупроводник (в пространственном распределении генерируемого заряда и величине ионизационных потерь), при правильном выборе длины волны ЛИ удастся моделировать эффекты, как от длиннопробежных, так и от короткопробежных частиц. При этом моделируется не сам механизм генерации неравновесного заряда, а эффекты, возникающие как следствие появления этого заряда в чувствительных областях элементов ИС.

Расчетно-экспериментальные оценки с учетом диффузионно-дрейфовых механизмов собирания заряда позволяют утверждать, что остро сфокусированное импульсное ЛИ способно возбуждать в активном слое ИС локальное пространственное распределение неравновесного заряда, аналогичное тому, которое реализуется к моменту формирования электрической реакции после пролета отдельной ТЗЧ.

Использование импульсных лазеров позволяет обеспечивать плотности неравновесного заряда, аналогичные создаваемым космическими лучами с максимальной ионизирующей способностью, и даже превосходящие их, воспроизводить практически все приведенные на рис. 1 типы ОРЭ, т.е. имитировать воздействие ТЗЧ, что является основанием для их применения при радиационных испытаниях.

Принципиальная возможность лазером инициировать в ИПЭ эффекты, аналогичные ОРЭ, вызванным пролетом ТЗЧ КП, легла в основу первых в России базовых «методов испытаний ИС на лазерных установках пикосекундной длительности со сфокусированным излучением», разработанных с участием автора и вошедших в РД В 319.03.24. В этом РД впервые конкретизирован базовый состав средств проведения лазерных испытаний, описано назначение отдельных элементов испытательной установки, кратко сформулированы технические требования к ним. Выработаны при-

остаточные – не исчезающие после окончания воздействия ТЗЧ эффекты, приводящие к изменению параметров ИС, и *кратковременные* – эффекты, исчезающие после воздействия.

Сфокусированный пучок импульсного ЛИ также способен локально генерировать в активном слое ИС неравновесный заряд, достаточный для проявления эффектов, аналогичных возникающим в результате пролета отдельной ТЗЧ. Несмотря на имеющиеся

ближенные соотношения для оценки параметров чувствительности БИС и СБИС, содержащих цифровые функциональные элементы, по измеренной (в нДж) энергии импульса ЛИ. Показано что пороговая энергия ТЗЧ, достаточная для переключения чувствительного элемента ИПЭ пропорциональна пороговой энергии импульса ЛИ, вызывающего ОРЭ.

В настоящее время в мире стабильно работает более десятка исследовательских центров, использующих лазерные методы для изучения ОРЭ, среди которых наиболее известны: EADS – European Aeronautic Defense and Space Company (Франция); IMS - Laboratory of Integration of Material to System, University of Bordeaux (Франция); Aerospace Corporation (США); JPL/NASA – Jet Propulsion Laboratory (США) и NRL – Naval Research Laboratory (США). Периодически публикуются результаты работ, выполненных на лазерных установках в MBDA (Великобритания); University of Saskatchewan (Канада); Lanzhou Institute of Physics (Китай); Vanderbilt (США).

Методические приемы, используемые сегодня в большинстве испытательных центров в основном похожи и сводятся к: 1) **Облучению со стороны активного слоя** (ограничено экранирующим действием металлизации); 2) **Облучению со стороны подложки** (лазерный пучок падает нормально к тыльной стороне кристалла и, в зависимости от используемой длины волны, толщину подложки уменьшают до 50-200 мкм, а длину волны излучения выбирают близкой к 1064 нм); 3) **Сканированию** с воздействием импульсом ЛИ с заданной энергией и регистрацией той или иной электрической реакции ИС; 4) **Построению карт ОРЭ**.

Для **определения порога возникновения ОРЭ** в выбранной точке обычно производится несколько воздействий лазерным импульсом с последовательно увеличивающейся энергией.

В последние годы АО ЭНПО «СПЭЛС» активно развивает и внедряет в практику испытаний не имеющую зарубежных аналогов **методику «локального облучения»**, как со стороны активного слоя, так и со стороны подложки. В основе данной методики лежит использование варьируемого размера пятна фокусировки в пределах от минимально возможного до 100 мкм.

В ведущих зарубежных исследовательских центрах в качестве источника ультракоротких импульсов применяются твердотельные пикосекундные неодимовые и фемтосекундные титан-сапфировые лазеры.

Целесообразность применения пикосекундных твердотельных лазеров с пассивной синхронизацией мод резонатора в исследованиях электрической реакции ИС была впервые экспериментально показана автором на собранных лабораторных лазерных установках “ПИКО-1” (1986) и “ПИКО-2” (2002). Исследования механизмов формирования ультракоротких импульсов, проведенные в ранних работах автора, привели к созданию лабораторных источников ультракоротких импульсов с энергией в импульсе до 100 мкДж, достаточной для экспериментального моделирования ОРЭ в ИПЭ. Низкая частота повторения импульсов, нестабильность энергетических, вре-

менных и пространственных характеристик лазерного пучка и отсутствие какой-либо автоматизации ограничивали применение этих лазеров для проведения полноценных испытаний. Однако, анализ недостатков и накопленный опыт позволили выработать подход к разработке новых технических средств, предназначенных именно для лазерных испытаний.

Общие требования к характеристикам средств проведения лазерных испытаний на стойкость к воздействию ТЗЧ

Общим требованием к лазерному комплексу для проведения испытаний ИПЭ на стойкость к воздействию ТЗЧ является наличие в его составе: лазерного источника, системы управляемого ослабления энергии ЛИ, системы фокусировки, системы визуализации и системы позиционирования объекта. Очевидно, каждый исследуемый образец ИПЭ должен обеспечиваться средством задания и контроля его параметров в процессе испытаний – системой функционального и параметрического контроля. Современный автоматизированный комплекс должен также обеспечивать обратную связь – возможность автоматического изменения параметров воздействия в зависимости от результатов измерения реакции объекта.

Основные требования к параметрам **лазерного источника** определяются выбором *длины волны, длительности импульса излучения и диапазона изменения энергии в импульсе*. От *параметров лазерного пучка* зависит достижимый минимальный размер пятна его фокусировки; *частота повторения импульсов и возможность их синхронизации с перемещениями объекта* определяют скорость и точность проведения сканирования.

При выборе длины волны учитывается, что для всех лазерных испытаний должно выполняться условие равномерности поглощения ЛИ по глубине чувствительной области. Результаты расчетного моделирования собирания заряда при пролете ТЗЧ в КМОП ИС, показали, что для эффектов одиночных сбоев глубина чувствительной области не превышает 5 мкм, а для тиристорного эффекта (ТЭ) – 20 мкм. Учитывая зависимость линейного коэффициента поглощения и соответствующей ему глубины проникновения от длины волны ЛИ, для большинства кремниевых ИС удовлетворительная равномерность поглощения излучения по всей глубине чувствительной области достигается при длинах волн ЛИ в диапазоне от 800 нм до 1100 нм. Наиболее часто для изучения ИС со стороны активного слоя используется длина волны 1064 нм.

Для ИС с проектными нормами менее 0.18 мкм расчетная эффективная глубина чувствительной области меньше, поэтому при лазерном воздействии со стороны приборного слоя рекомендуется выбирать длину волны в диапазоне 800...950 нм. Для изделий, изготовленных по тонкопленочной технологии (например, КНИ (кремний на изоляторе) и КНС (кремний на сапфире)), допускается уменьшение длин волн до 530 нм. Для некремниевых ИС длина волны ЛИ выбирается так, чтобы коэффициент поглощения в соответствующем полупроводнике был равен коэффициенту по-

глощения кремния при указанных выше длинах волн. Для подбора длины волны необходимо оборудование с перестраиваемой длиной волны.

О **влиянии длительности импульса лазерного возбуждения** на получаемые оценки параметров стойкости ИС можно было бы судить путем сравнения длительностей лазерного импульса $\tau_{\text{л}}$ и импульса внутренней ионизационной реакции (ИР) **элемента** ИС $\tau_{\text{ир}}$. Оценка величины $\tau_{\text{ир}}$ возможна лишь на основании модельных расчетов. Так, например, в работе приведена оценка данного параметра для КМОП ячейки статического ОЗУ ($\tau_{\text{ир}} \approx 10$ пс).

При анализе влияния $\tau_{\text{л}}$ можно выделить два характерных случая:

1) **при $\tau_{\text{л}} \ll \tau_{\text{ир}}$** длительность ИР на элементе ИС определяется процессами собирания неравновесных зарядов после значительно более короткого возбуждения, аналогичного пролету ТЗЧ, и практически не зависит от $\tau_{\text{л}}$;

2) **при $\tau_{\text{л}} \geq \tau_{\text{ир}}$** форма импульса ИР в той или иной степени повторяет форму импульса возбуждения, так как генерация неравновесных зарядов продолжается в течение всего импульса возбуждения. Поскольку характерное время взаимодействия ТЗЧ с активными слоями современных ИС не превышает нескольких пикосекунд, адекватность моделирования пролета ТЗЧ при такой длительности импульса нарушается. Пороговая энергия, приводящая к накоплению критического заряда, растет за счет возрастающего вклада диффузии в собирание неравновесных зарядов с увеличением длительности импульса возбуждения.

Следовательно, использование лазерных импульсов с длительностью, больше характерного времени ИР элемента ИС может привести к завышению получаемых оценок пороговых энергий и других параметров стойкости ИС. Для одиночных сбоев (ОС) в статических ОЗУ характерным является время переключения ячейки (доли наносекунды). Для импульсов > 1 нс пороговая энергия линейно возрастает с увеличением длительности.

Для ТЭ, в отличие от ОС, время нарастания электрической реакции обусловлено собиранием заряда с активированных паразитных многослойных структур, площадь которых существенно превышает площадь собирания заряда, характерную для ОС (как правило, в объемных КМОП структурах это область перехода сток-подложка). Поэтому при облучении элементов ИС, подверженных ТЭ, импульсами с энергией значительно ниже порога ТЭ, измерение длительности фронта ИР позволяет оценить время нарастания внутренней электрической реакции исследуемой структуры. Эксперименты показывают, что время включения ТЭ, хотя и зависит от типа ИС, в большинстве современных ИС превышает 20 нс. Следовательно, *для исследования ИС только по ТЭ могут применяться лазерные установки с длительностью импульса до 20 нс!*

Поскольку другие типы ОРЭ также основаны на собирании критического заряда, по аналогии с ОС и ТЭ, можно заключить, что использование лазерных установок с длительностью < 10 пс (включая фемтосекундный диапазон) является предпочти-

тельным с точки зрения достижения максимальной адекватности лазерного воздействия и пролета ТЗЧ. В этом случае к “началу” формирования электрической реакции пространственные распределения сгенерированных электронов при обоих воздействиях могут практически совпадать.

Требуемый *диапазон изменения энергии в импульсе ЛИ* при испытании конкретного типа ИС зависит от длительности импульса, используемой длины волны и диаметра пятна в области облучения, способа облучения (со стороны активного слоя или подложки), суммарных потерь в оптическом тракте и др.

Измерения целесообразно начинать со значения энергии вблизи порога эффекта J_0 , а увеличение энергии проводить до насыщения значений сечения эффекта. При этом максимальная энергия может превышать пороговую как минимум на два порядка. Типичное значение пороговой энергии для эффекта ОС в КМОП ИС при длине волны 1064 нм и диаметре пятна 2 мкм лежит в пределах от 0.01 до 0.2 нДж, а для ТЭ от 0.5 до 1 нДж. Энергия, достаточная для возникновения ОРЭ, зависит от топологических особенностей типа ИС, наличия поглощающих или отражающих слоев и качества декапсуляции.

Верхнее значение имеет смысл определить по минимальной плотности энергии в пятне фокусировки, при которой возникают необратимые повреждения. По опыту автора, при использовании излучения $\lambda=1064$ нм с длительностью импульса 25 пс, при фокусировке в пятно порядка 30 мкм на поверхности кремниевой пластины, начиная с энергии порядка 700 нДж, наблюдается изменение оптических свойств поверхности, а при 1000 нДж – образуется кратер. При острой фокусировке ЛИ в пятно диаметром 2 мкм на области металлизации можно получить прожог при энергии 12-15 нДж. Таким образом, для проведения испытаний ИПЭ на чувствительность по различным ОРЭ сфокусированным пучком требуется возможность варьировать энергию ЛИ на исследуемом объекте в пределах от 10 пДж до 1000 нДж.

Проведённый автором анализ спектральных, временных и энергетических параметров лазерного облучения различных ИПЭ для экспериментальных исследований ОРЭ кратко обобщен в таблице 1.

Таблица 1. Требования к параметрам импульсов ЛИ для исследования ОРЭ

Объект	Облучение со стороны активного слоя			Облучение со стороны подложки		
	Длина волны λ , мкм	Длительность импульса τ , пс	Энергия импульса J , мкДж	Длина волны λ , мкм	Длительность импульса τ , пс	Энергия импульса J , мкДж
ЦИС и БИС	0,8...1,068	≤ 200	$\geq 0,1$	0,9...1,068	≤ 200	$\geq 0,3$
АИС	0,8...1,068	≤ 10000	$\geq 0,1$	0,9...1,068	≤ 10000	$\geq 0,3$
СБИС (≥ 0.35 мкм)	0,8...1,068	≤ 150	$\geq 0,2$	0,95...1,068	≤ 150	$\geq 0,5$
СБИС (≥ 0.13 мкм)	0,53...1,068	≤ 100	≥ 1	0,95...1,068	≤ 100	≥ 3
СБИС (≥ 28 нм)	0,53...1,068	≤ 70	≥ 2	0,95...1,068	≤ 70	≥ 6
СВЧ ИС	0,53...1,068	≤ 10	≥ 1	0,95...1,068	≤ 10	≥ 2
GaAs ИПЭ	0,7...0,85	≤ 30	≥ 1	0,7...0,85	≤ 30	≥ 2
МОПТ	-	-	-	0,95...1,068	≤ 150	$\geq 0,5$
КНИ ИС	0,53...0,65	≤ 70	≥ 2	0,95...1,068	≤ 70	≥ 6

Решающее значение при выборе лазерного источника имеют **параметры лазерного пучка** – его **расходимость, состав мод и диаметр на выходе лазера**. При прохождении через линзовые системы (например, объектив системы фокусировки) лазерный пучок преобразуется с изменением основных параметров подобно гауссову пучку. Расчеты в гауссовом приближении показывают, что для обеспечения фокусировки, близкой к дифракционному пределу, необходимо использовать одномодовый пучок, тщательно согласованный со всеми оптическими элементами на всем оптическом пути от лазера до облучаемого объекта.

Основным элементом **системы фокусировки** должен быть микроскоп с оптической схемой, скорректированной (для облегчения ввода ЛИ в его оптический тракт) на бесконечность. Для наблюдения поверхности объекта со стороны активного слоя необходимо предусмотреть установку камеры видимого диапазона, а для проведения исследований со стороны подложки – камеры ближнего ИК-диапазона.

Для получения поля зрения >1000 мкм и разрешения не хуже 0.06 мкм/пиксель при использовании объектива $100\times$ микроскоп должен иметь апертуру канала наблюдения ≥ 25 мм для установки камеры с размером матрицы до $1''$. Для защиты видеокамер от повреждения излучением, отраженным от объекта, необходимо предусмотреть спектральные светофильтры.

Для фокусировки излучения на объекте необходимо использовать тот же объектив, что и для визуализации облучаемой области. Помимо кратности увеличения, особое внимание следует уделить числовой апертуре, рабочему расстоянию объектива, его апохроматичности в видимой и ближней ИК-областях спектра, а также стойкости к мощному ЛИ.

Требования к **системе ослабления** ЛИ достаточно уникальны, так как они вытекают из необходимости изменения энергии импульса ЛИ, падающего на объект в пределах от порога возникновения ОРЭ (~ 10 пДж, при $\lambda = 1064$ нм) до значений, когда наблюдается насыщение сечений ОРЭ (~ 10 нДж, при $\lambda = 1064$ нм), что соответствует диапазону ослабления $\geq 1-10^3$). Требования к динамическому диапазону ослабления должны выполняться во всем рабочем диапазоне длин волн ЛИ. Более того, чтобы обеспечить возможность применения методики “локального” облучения, необходимо расширить динамический диапазон ещё на 1-2 порядка.

Система позиционирования объекта для обеспечения совмещения положения поверхности образца с плоскостью острой фокусировки лазерного пучка и прецизионного перемещение образца ИС в объектной плоскости ХУ с необходимой скоростью для сканирования должна удовлетворять следующим требованиям: *точность перемещения* исследуемого объекта в плоскости ХУ и по оси Z (вдоль луча) должна быть не менее чем на порядок меньше минимального диаметра перетяжки лазерного пучка и длины фокальной области, соответственно; *перемещение в плоскости ХУ* должно быть, как минимум, достаточным для проведения сканирования в пределах всего кристалла; желательно обеспечить возможность сканирования и в пределах не-

скольких кристаллов одного функционального модуля с минимальным числом его перестановок; *перемещение вдоль оси Z* должно обеспечивать фокусировку/расфокусировку пучка в любой точке кристалла, а также удобную смену образцов в процессе испытаний; *скорость перемещений* влияет на полное время выполнения операций сканирования и должна быть не менее 500 мкм/с.

Системы функционального и параметрического контроля предназначена для задания режимов работы и контроля состояния исследуемой ИС. Работа аппаратуры функционального и параметрического контроля должна быть синхронизирована во времени с моментом лазерного воздействия.

Система управления на базе ПК должна обеспечивать работу и «интеллектуальное взаимодействие» всех модулей комплекса.

Выполнение представленных выше основных требований к техническим средствам проведения лазерных испытаний ИПЭ являются необходимым, но недостаточным. Эффективная работа испытательного комплекса невозможна без развитого методического обеспечения, включающего методики настройки отдельных систем и периодической проверки их работоспособности.

Автором предложена математическая модель распространения ЛИ в многослойной микроэлектронной структуре при фокусировке на исследуемом элементе в активной области ИС, учитывающая наличие изолирующих слоев различной толщины при облучении ИС со стороны активного слоя и влияние толщины подложки при облучении со стороны подложки. На основании этой модели разработана **методика расчета корректирующего сдвига плоскости фокусировки относительно поверхности объекта**, обеспечивающая наименьшее изменение поперечного распределения интенсивности ЛИ по глубине при одновременном сохранении малого диаметра пучка в перетяжке. Это достигается расчетом величины сдвига, при котором диаметры пучка на входе и выходе активной области заданной толщины совпадают. Следует отметить, что на параметры Гауссова пучка внутри активной области ИС могут повлиять пассивирующие слои. Из графика на рис. 2 видно, что наличие на поверхности ИС слоя кварца с показателем преломления $n = 1,5$ с характерной толщиной 14 мкм почти вдвое увеличивает расходимость пучка в кремнии, что важно принять во внимание при расчетах параметров фокусировки.

При облучении со стороны подложки следует учитывать, что расходимость пучка меняется при переходе через границу раздела. Так, пучок ЛИ с длиной волны 1064 нм, сфокусированный на поверхности кремния объективами с числовыми апертурами $NA = 0,5$ и $NA = 0,8$, имеет расходимости, равные соответственно 0,5 и 0,8 в воздухе и 0.14 и 0.23 в кремнии. При этом глубина фокуса в кремнии равна 4.74 мкм для $NA = 0,5$ и 1,85 мкм для $NA = 0,8$. На рис. 2 приведен пример рассчитанного профиля пучка, показывающий, что, действительно, при выборе объектива с максимальным возможным значением NA следует ожидать уменьшения пятна фокусировки. Однако при этом увеличивается расходимость пучка и уменьшается глубина фокуса.

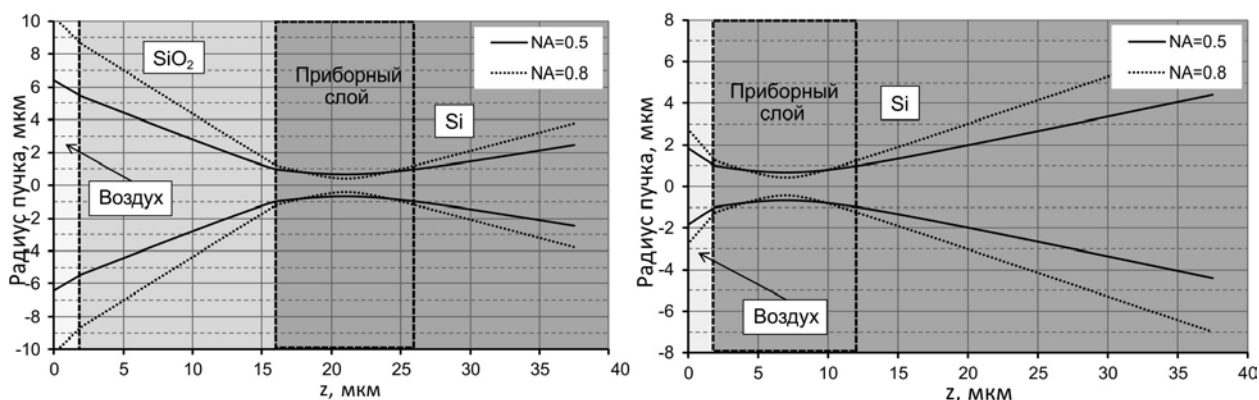


Рис. 2 – Расчетный профиль Гауссова пучка при различных значениях числовой апертуры

Предложенная методика расчета помогает при выборе объектива находить компромисс между максимальным пространственным разрешением и обеспечением относительной однородности плотности генерируемого заряда в толщине активной области ИС.

Технические средства проведения лазерных испытаний ИПЭ на стойкость к воздействию ТЗЧ

Основной принцип, принятый автором на этапе проектирования лазерных комплексов: перенос функциональной нагрузки от механических узлов к интеллектуальным (электронным, компьютерным и информационным) модулям, которые можно легко перепрограммировать под новые задачи.

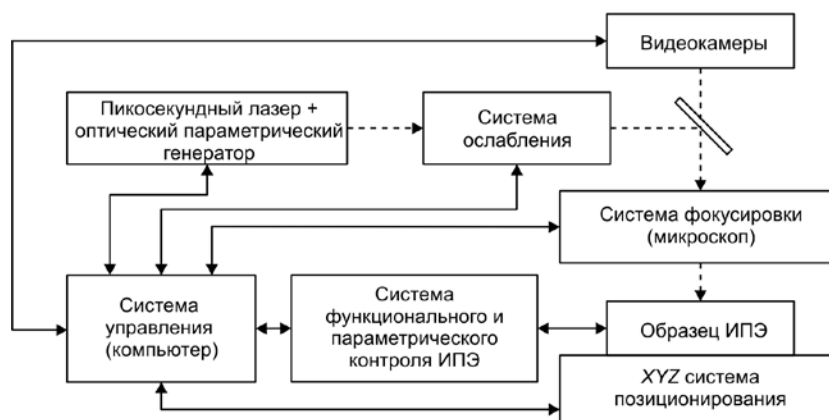


Рис. 3 – Базовая блок-схема комплекса аппаратуры для лазерных испытаний

Главная концепция построения лазерной части комплекса: создание источника высокостабильных генерируемых импульсов с большим динамическим диапазоном управляемого прецизионного изменения их энергии.

Выработанная автором базовая блок-схема комплекса аппаратуры для лазерных испытаний представлена на рис. 3. Излучение пикосекундного лазера, пройдя через систему ослабления, фокусируется с помощью объектива на исследуемый кристалл ИС в пятно с минимальным диаметром. Трехкоординатная система позиционирования обеспечивает прецизионное перемещение образца в объектной плоскости XY и совмещение положения поверхности исследуемой ИС по оси Z с плоскостью острой фокусировки лазерного пучка. Визуальное наблюдение и фотографирование поверх-

ности кристалла осуществляются с помощью видеокамеры, сигнал с которой обрабатывается компьютером и выводится на монитор. Задание параметров импульса излучения, подачу функциональных команд и синхронизацию работы всех модулей комплекса осуществляет единая система управления на базе ПК. Задание режимов работы, контроль и управление питанием, проверку работоспособности ИС путем выполнения тестов и, наконец, формирование сигналов “обратной связи” для системы управления осуществляет система функционального и параметрического контроля.

В качестве источника излучения в разработанных комплексах ПИКО-3 и ПИКО-4 были выбраны пикосекундные твердотельные Nd:лазеры с диодной накачкой и пассивно-активной модуляцией добротности резонатора PL2201 (Nd:YAG, 70 пс, 1-1000 Гц, $\lambda_1 = 1064$ нм с энергией 0.1 мДж, $\lambda_2 = 532$ нм – 0.04 мДж) и PL2210A (Nd:YVO₄, 25 пс, 1-1000 Гц, $\lambda_1 = 1064$ нм с энергией 0.94 мДж и $\lambda_2 = 532$ нм – 0.65 мДж). Максимальная энергетическая нестабильность данных лазеров составляет 2%. Для обеспечения возможности перестройки длины волны излучения в модуль источника ЛИ комплекса ПИКО-4 добавлен оптический параметрический генератор (ОПГ) PG503.

Полная автоматизация процесса настройки всех элементов лазера и ОПГ, а также возможность организации информационного канала с ними, делает данные модули в совокупности современным высоконадежным источником перестраиваемых по длине волны пикосекундных импульсов с высокой стабильностью и воспроизводимостью выходных параметров.

Для выполнения всех перечисленных выше требований в качестве базового элемента при построении модуля фокусировки и визуализации был выбран микроскоп модели Mic301LP. При разработке данного модуля предусматривалась возможность его сопряжения с различными лазерными источниками, отличающимися наборами длин волн. Для работы в составе комплекса ПИКО-4 оптические характеристики элементов, направляющих лазерный пучок вдоль оптического канала, были оптимизированы для двух диапазонов длин волн ОПГ (700-1000 и 1150-2200 нм). Для получения высококонтрастного бестеневого изображения с правильной цветопередачей в видимом диапазоне в данной конструкции микроскопа использован телецентрический осветитель Келлера.

Важной особенностью разработанной конструкции при облучении ИЭП со стороны активного слоя является возможность контролировать точность фокусировки ЛИ по четкости изображения в канале визуализации, т.е. точно совместить плоскость острой фокусировки ЛИ с предметной плоскостью микроскопа.

Однако, при реализации способа облучения ИПЭ со стороны подложки, на микроскопе с одной видеокамерой видимого диапазона контроль фокусировки по изображению невозможен из-за поглощения видимого света в толстом слое подложки. В комплексах ПИКО-3 и ПИКО-4 модуль фокусировки оснащен вторым каналом визуа-

лизации в ИК-диапазоне. Для работы с камерами видимого и инфракрасного диапазонов используется волоконный галогенный источник света.

Для получения изображения большого разрешения и острой фокусировки лазерного пучка используются лазерно-стойкие апохроматичные в видимой и ближней ИК-области спектра объективы Mitutoyo Plan APO NIR с кратностями $20\times$ и $100\times$ с увеличенными рабочими расстояниями 20 мм и 12 мм, соответственно. Объектив $5\times$ применяется для панорамного обзора объекта.

Наиболее качественного изображения удалось добиться при использовании в обоих каналах видеокамер для видимого и ближнего ИК-диапазона.

Правильное сочетание параметров примененных видеокамер, осветителя и селективных фильтров позволило обеспечить контроль фокусировки по четкости изображения и при облучении ИС со стороны подложки.

Система ослабления ЛИ – модуль, в значительной степени определяющий точность количественных оценок измеряемых энергетических порогов ОРЭ лазерными методами. При разработке данной системы для комплексов ПИКО-3 и ПИКО-4 ставилась задача обеспечить динамический диапазон регулировки энергии $\geq 10^5$ во всем рабочем диапазоне длин волн ЛИ. Для стандартных систем из двух просветленных поляризационных призм (ПП), одна из которых может поворачиваться вокруг общей для призм оси, типичная величина максимального коэффициента ослабления не более 300. Такой диапазон недостаточен.

Для повышения динамического диапазона и фиксации плоскости поляризации выходного излучения автором была рассчитана, разработана и апробирована конструкция ослабителя на основе трех соосных ПП, в которой плоскости поляризации первой и третьей неподвижных ПП параллельны, а вторая (по ходу луча) ПП может поворачиваться на угол φ вокруг общей для всех призм оси. Суммарный коэффициент пропускания такой системы существенно выше двухпризменной и достигает фактической величины 10^5 раз. Разработанная уникальная система ослабления с прецизионным шаговым приводом вращения после тщательной настройки не требует дальнейшего обслуживания и обеспечивает плавное изменение коэффициента ослабления энергии в диапазоне $1-10^5$ с отклонением от расчетного значения $<5\%$ независимо от используемой длины волны. В сочетании со стабильностью лазерного источника программно-управляемая система ослабления снимает необходимость дополнительного контроля энергии в каждом лазерном импульсе.

Как показали расчеты, нормированное пропускание трехпризменной системы чувствительно к неточности установки начальных углов α и β между плоскостями поляризации первой и третьей (α) и первой и второй (β) призм и монотонно возрастает с увеличением коэффициента ослабления. Излагается пошаговая методика оптимальной настройки модуля плавного ослабления энергии ЛИ с динамическим диапазоном 10^5 , основанная на тонкой подстройке угла установки третьей призмы α с помощью специально разработанной автором конструкции держателя выходной ПП с

микрометрическим винтом.

В комплексах ПИКО-3 и ПИКО-4 система управления представляет собой современный ПК, оснащенный всеми необходимыми интерфейсами для интеллектуального взаимодействия со всеми перечисленными модулями и организации внешних сетевых и внутренних информационных каналов.

Апробация разработанных технических и методических средств проведения лазерных испытаний ИПЭ на стойкость к воздействию ТЗЧ

На базе изготовленных по разработанной автором технической документации модулей, были собраны, налажены и запущены в эксплуатацию лазерные испытательные комплексы на базе наносекундного (РАДОН-9Ф) и пикосекундных (ПИКО-3 (рис. 4 слева) и ПИКО-4 (рис. 4 справа)) источников ЛИ.

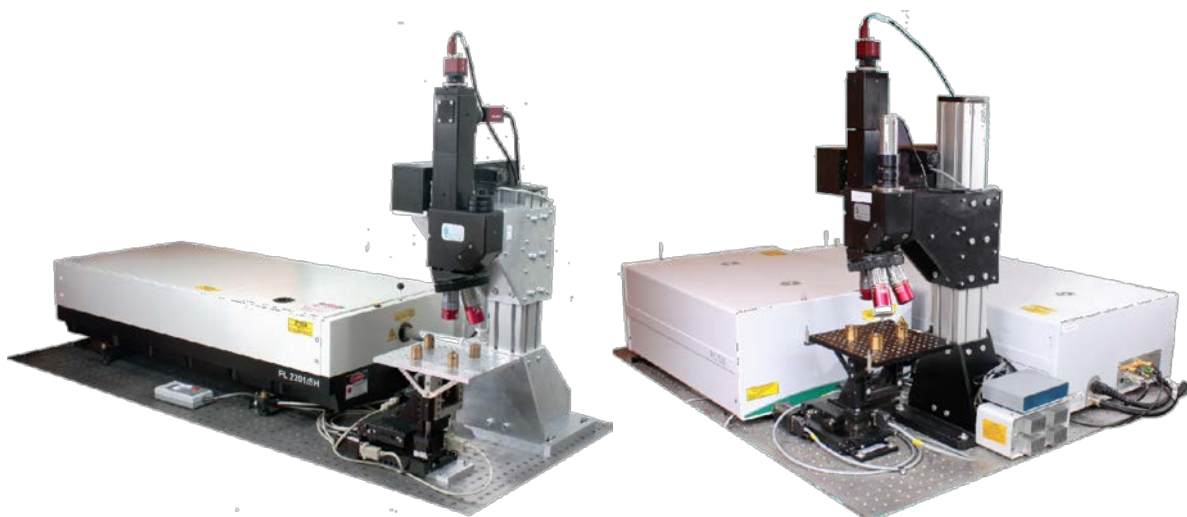


Рис. 4 – Лазерные испытательные комплексы ПИКО-3 (слева) и ПИКО-4 (справа)

Процедуры и периодичность измерений наиболее критических параметров систематизированы и регламентированы в методиках аттестации рассматриваемых испытательных комплексов, согласованных с ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России. Одна из таких разработанных при участии автора методик для лазерного комплекса «ПИКО-3», представлена в приложении к диссертации.

Аттестация проводится на основе исследования энергетических и пространственно-временных характеристик поля ЛИ. Периодический контроль максимальной энергии в импульсе позволяет оценить общее состояние лазерной системы и выявить возможную деградацию оптических элементов или необходимость дополнительной подстройки оптической схемы. Проверка линейности системы ослабления энергии лазерных импульсов, особенно в диапазоне малых энергий, позволяет оценить погрешность всех измерений пороговых энергий возникновения ОРЭ, а контроль 2D-профиля позволяет следить за стабильностью пространственного профиля лазерного пучка, что чрезвычайно важно при применении методики локального облучения. Измерение распределения интенсивности в пучке на нескольких расстояниях от фокуса позволяет определить значение и погрешность NA пучка, используемые при задании

размеров области облучения лазерным импульсом в зависимости от смещения объекта от фокальной плоскости.

Результаты аттестации позволяют сделать заключение о пригодности испытательного оборудования с указанием, при необходимости, области применения ЛИ при определении показателей стойкости ИПЭ к воздействию факторов 7.К9, 7.К10, 7.К11, 7.К12 (по одиночным эффектам).

Технические характеристики были тщательно измерены после окончательной настройки всех модулей и комплексов в целом (в таблице 2 представлены основные технико-эксплуатационные характеристики комплексов ПИКО-3 и ПИКО-4).

Таблица 2. Основные технико-эксплуатационные характеристики лазерных испытательных комплексов ПИКО-3 и ПИКО-4

Параметр	ПИКО-3	ПИКО-4
Источник излучения (лазер)	Nd:YAG	Nd:YAG + ОПГ
Длины волн, нм	1064/532	700–1000 и 1150–2200
Максимальная энергия импульса на объекте, мкДж	8/3	11.5
Длительность лазерного импульса (FWHM), пс	70	25
Стабильность энергии импульса, %	± 2	± 4
Частота повторения импульсов, Гц	0–1000	
Коэффициент ослабления энергии импульса	1–10 ⁵	
Модели видеокамер видимого (ближнего ИК) диапазонов:	Guppy F-146C (Goldeye P-032)	
Тип сенсора	ПЗС-матрица (InGaAs матрица)	
Разрешение, пиксель	1392×1040 (636×508)	
Частота кадров, мкм/пиксель	17 (30)	
Пространственное разрешение	0.3 (1.6)	
Тип интерфейса	IEEE 1394a (Gig-E)	
Объективы:	Plan APO NIR 5 [×] , 20 [×] и 100 [×]	
Минимальный размер пятна (1/e ²) для 20 [×] , мкм	2.4/1.4	3.0
XYZ-позиционирование объекта	Моторизированное	
Минимальный шаг, мкм	0.125/0.125/0.156	
Диапазон перемещения X/Y/Z, мм	100/100/25	
Максимальная линейная скорость X/Y, мкм	500/500	
Максимальный размер объекта, мм	400	
Рабочее расстояние до объектива 20 [×] , мм	20	
Охлаждение	Воздушное конвекционное	
Габаритные размеры комплекса, мм	1200×600×870	1200×1000×800
Потребляемая мощность от сети ~ 220 В, 50 Гц	< 1	< 1.2

Автором проведена серия экспериментов (Рис. 5) по определению предельных возможностей комплексов ПИКО по точности локализации чувствительных к ОС элементов в тестовом кристалле ОЗУ с известным расположением логических адресов ячеек памяти, показавшая, что точность локализации чувствительных областей к возникновению ОС составляет около 1-2 мкм.

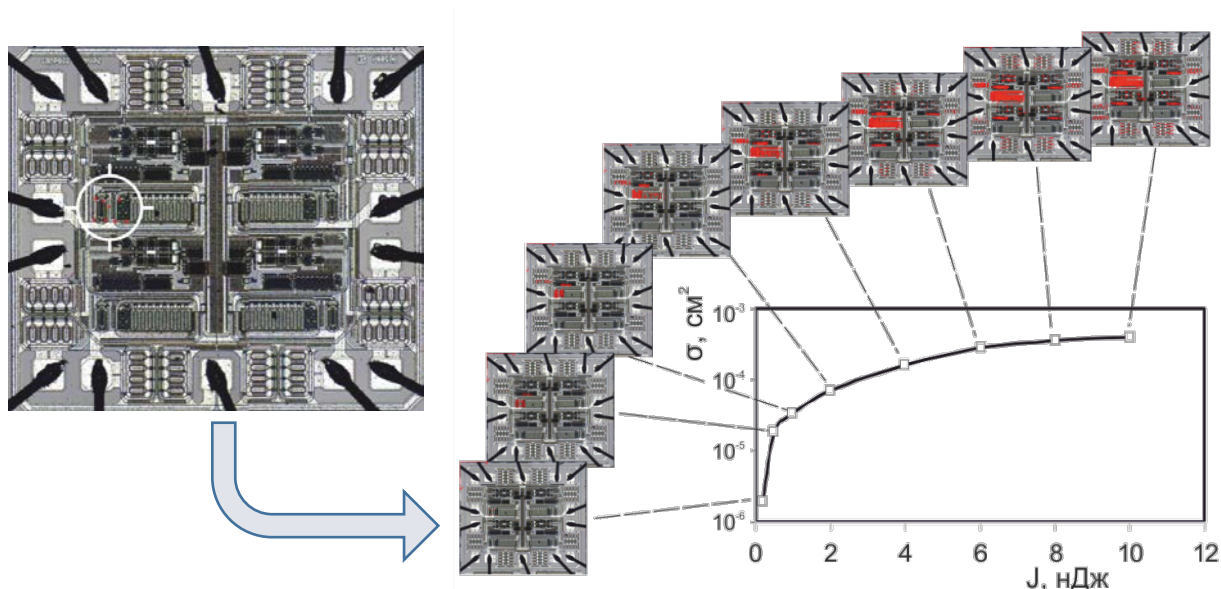


Рис. 5 – Локализация чувствительной области и график зависимости сечения ИО σ от энергии лазерного излучения J для КМОП ИС 5584ЛА3У (проектные нормы 2 мкм)

На серии радиационно-стойких 8-битных микроконтроллеров 1886BE10 исследованы зависимости сечения функциональных сбоях (ФС) от частоты функционирования. Пр продемонстрированы реальные возможности комплексов ПИКО по изучению динамической чувствительности ИС к одиночным сбоям и функциональным прерываниям в различных режимах работы и условиях эксплуатации (например, при изменении температуры).

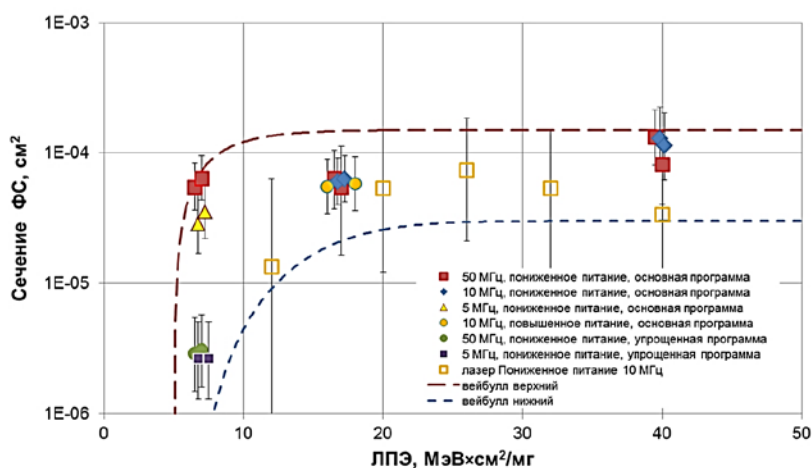


Рис. 6 – Зависимость сечения ФС от ЛПЭ при различных значениях рабочей частоты, напряжения питания, типа программы и температуры в микроконтроллере 1886BE10

Автором разработана базовая методика оценки параметров чувствительности ИПЭ к эффектам от воздействия ТЗЧ с помощью сфокусированного ЛИ, которая включает в себя следующие этапы:

1. Подготовка ИПЭ: декапсуляция, получение панорамного снимка топологии, задание электрических параметров и режима работы, выбор и проведение функционального теста.
2. Установка ИПЭ на испытательный стенд: ориентация, фиксация, задание начала координат и параметров коррекции фокусировки.
3. Предварительное сканирование всей поверхности ИПЭ лазерным пятном диаметром 30...100 мкм для обнаружения наиболее чувствительных областей.
4. Определение порога ОРЭ $J_{\text{пор}}$: в выбранной точке наиболее чувствительной обла-

сти производится несколько воздействий сфокусированным ЛИ с последовательным увеличением энергии в импульсе.

5. Определение сечения ОРЭ $\sigma_{ОРЭ}$. Сканирование всей площади кристалла ИПЭ сфокусированным ЛИ с энергией в импульсе $J > J_{пор.}$ с регистрацией количества событий ОРЭ и полного количества лазерных воздействий.
6. Построение зависимости $\sigma_{ОРЭ}(J)$. Повторение п.5 с последовательным увеличением энергии ЛИ до уровня энергии лазерного импульса, при котором наблюдается насыщение $\sigma_{ОРЭ}$, либо до предельно допустимой энергии.
7. Оценка коэффициента пропорциональности между энергией импульса ЛИ J и эквивалентным значением ЛПЭ ионов. Проводятся калибровочные оценки сечений ОРЭ для 2-3 ионов, для которых сечения отличаются более чем в 100 раз.

Описанная выше методика, основанная на проведении серии сканирований кристалла ИПЭ сфокусированным лазерным излучением с последующей калибровкой на ионах, была многократно применена автором при проведении испытаний различных ИПЭ, как при облучении со стороны активного слоя, так и при облучении со стороны подложки.

На рис. 7 приведен результат калибровки по ионам зависимости сечения ОС от ЛПЭ в ИС K6R4016V (статическое оперативное запоминающее устройство информационной емкостью 4 Мбит с организацией 256Kx16 и напряжением питания 4,5...5,5 В).

Калибровочные измерения данной ИС на ионах позволили уточнить пороговые ЛПЭ ТЗЧ по ОС и сечение насыщения по ОС при воздействии ТЗЧ: ($\sigma_{ОС_Z} \approx 2 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{бит}$). Методика позволяет подробно проследить зависимости сечения ОРЭ от ЛПЭ и параметры чувствительности при наличии всего лишь двух значений сечений при облучении ионами с различным значением ЛПЭ.

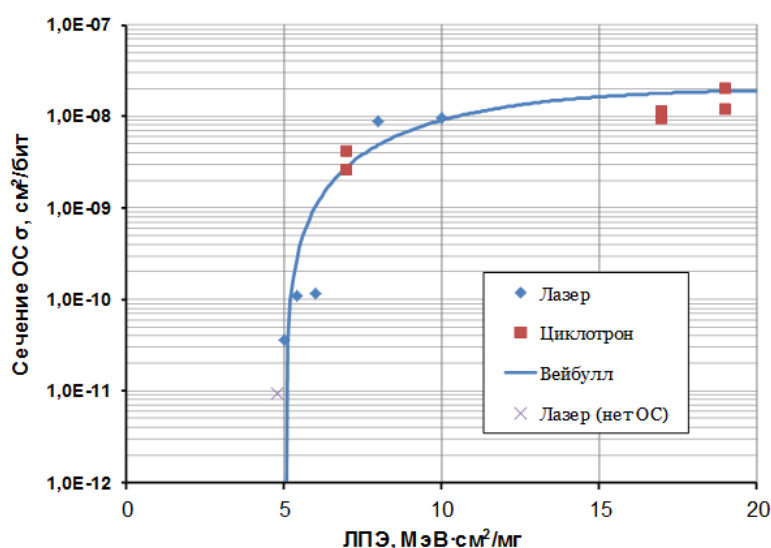


Рис. 7 – Результаты калибровки по ионам для определения порога регистрации ОС

В следующем примере объектом являлись микросхемы SST39V – флэш-память емкостью 4 Мбит с организацией 512K×8, изготовленные компанией Microchip Technology по КМОП технологии. Важно отметить, что в этих схемах ЛИ не способно вызывать ОС в ячейках памяти, так как оно не способно ионизировать диэлектрик. С другой стороны, в этих схемах возможны ФС и ТЭ.

В ходе экспериментов на ускорителе ионов были обнаружены ТЭ и получено два значения сечений при повышенной температуре $+70^{\circ}\text{C}$. Более точная форма зависимости сечений ТЭ от ЛПЭ (Рис. 8) была определена путем сканирования сфокусированным ЛИ с длиной волны $\lambda = 870$ нм на испытательном комплексе ПИКО-4. Проведена коррекция по калибровочным измерениям на ионах, после чего на лазерном комплексе была получена ещё одна зависимость сечений от ЛПЭ для температуры $+25^{\circ}\text{C}$.

Данный эксперимент позволил уточнить форму зависимости сечения ТЭ от ЛПЭ при температуре $+70^{\circ}\text{C}$ и определить

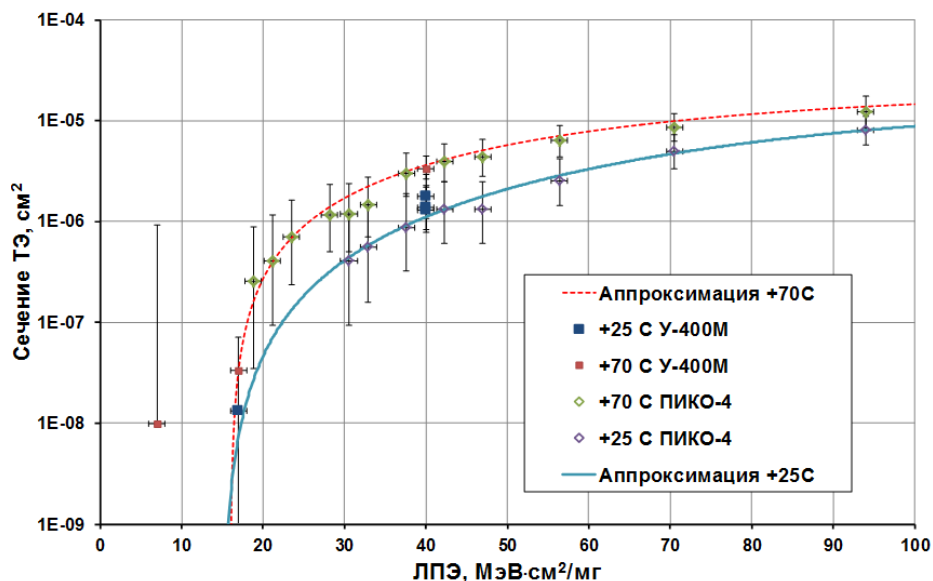


Рис. 8 – Результаты расчетно-экспериментальной оценки сечения ТЭ во флеш-памяти SST39V при двух значениях температуры

параметры чувствительности по ТЭ при температуре $+25^{\circ}\text{C}$, что было невозможно сделать только по результатам экспериментов на ионах. Из графика видно, что пороговое ЛПЭ практически не зависит от температуры в исследуемом интервале температур, а сечение насыщения отличается не более чем в 2-3 раза. В то же время заметное изменение формы зависимости сечения ТЭ от ЛПЭ может приводить к существенному изменению вероятности ТЭ на орбите космического аппарата, особенно для орбит со значительным потоком частиц с ЛПЭ $30\text{--}40$ МэВ·см²/мг.

К настоящему времени на рассматриваемых комплексах Радон-9Ф, ПИКО-3 и ПИКО-4 испытано более 200 типов различных отечественных и зарубежных ИПЭ по эффектам ОС и ТЭ и другим ОРЭ.

Представленная апробация показала, что проведение лазерных испытаний по методике сфокусированного лазерного облучения с последующей коррекцией результатов по калибровочным измерениям на ускорителях ионов позволяет:

- более точно определять параметры чувствительности по ОРЭ в случае недостаточности экспериментальных данных по сечениям ОРЭ, полученным только на ускорителе ионов;
- исследовать влияние электрических и температурных режимов на параметры чувствительности к ОРЭ.
- разделять различные типы ОРЭ (ОС и ТЭ, ФС).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной результат диссертации заключается в решении актуальной научно-технической задачи по разработке и созданию технических и методических средств проведения испытаний ИПЭ, применяемых в бортовых устройств ВТ и СУ космических аппаратов, на стойкость к воздействию ТЗЧ на основе лазерных установок ультракороткой длительности со сфокусированным излучением.

Основные научные (теоретические) результаты диссертации:

- обоснованы требования к характеристикам ЛИ для исследования ИПЭ с различными схемотехнологическими решениями;
- предложена оригинальная базовая модульная схема лазерных испытательных комплексов для исследования стойкости ИС к воздействию ТЗЧ по ОРЭ, позволяющая реализовывать испытания различных типов ИПЭ;
- разработана базовая методика оценки параметров чувствительности ИС к эффектам воздействия ТЗЧ с помощью сфокусированного ЛИ;
- обоснован выбор метода пассивной синхронизации мод для получения пикосекундных импульсов с высокой временной, пространственной и энергетической стабильностью до 1%;
- разработана математическая модель для оценок локального энерговыделения сфокусированного ЛИ в чувствительных областях типовых микроэлектронных структур при облучении ИС со стороны как активного слоя с учетом наличия диэлектрических слоев различной толщины, так и подложки с учетом влияния ее толщины.

Практическая значимость работы:

- Разработаны новые технические средства (РАДОН-9Ф, ПИКО-2, ПИКО-3, ИСЛМ, ПИКО-4), которые внедрены в практику радиационных испытаний ИПЭ на стойкость к воздействию ТЗЧ. На экспериментальные комплексы ПИКО получены патенты на полезную модель: ПИКО-3 – №110488 и ПИКО-4 – №168496, зарегистрированные в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 20.11.2011 г. и 06.02.2017 г., соответственно. На лазерных комплексах РАДОН-9Ф, ПИКО-3 и ПИКО-4 проведены испытания более 200 различных типов микросхем.
- Разработаны методики аттестации пикосекундных лазерных испытательных комплексов ПИКО-3 и ПИКО-4, которые используются при первичной и периодической аттестации.
- Проведены сравнительные экспериментальные исследования ряда ИПЭ на оригинальных лазерных комплексах и ускорителях ионов, которые показывают хорошую корреляцию полученных результатов и эффективность применения разработанных лазерных комплексов для проведения испытаний ИПЭ на стойкость к воздействию ТЗЧ.
- Результаты диссертации вошли в отчетные материалы по НИР и составным частям ОКР («Остров», «Контроль РД», «Информация РС», «Микро-Д», «РАД-ИКВ» и др.),

выполненных в интересах Минобороны РФ, Минпромторга РФ, Росатома, предприятий Роскосмоса и оборонного комплекса.

- Изложенные в диссертации результаты легли в основу нормативного документа РД В 319.03.24 «Методы испытаний и оценки стойкости больших и сверхбольших интегральных схем к одиночным сбоям от воздействия отдельных высокоэнергетичных тяжелых заряженных частиц и протонов космического пространства».

Основной практический результат диссертации заключается в разработке, создании, аттестации и внедрении в АО «ЭНПО СПЭЛС», НИЯУ «МИФИ» экспериментальных аппаратно-программных комплексов РАДОН-9Ф, ПИКО-3, ПИКО-4 на основе импульсных лазеров нано- и пикосекундного диапазона.

Таким образом, в ходе работы над диссертацией **достигнута ее основная цель**, а именно: разработаны, реализованы и внедрены технические и методические средства прогнозирования радиационной стойкости изделий полупроводниковой электроники (на основе Si, GaAs, SiGe и др.) при воздействии ТЗЧ. Усовершенствованные методики моделирования доминирующих одиночных радиационных эффектов, адаптированные под созданные оригинальные аппаратно-программные испытательные лазерные комплексы, обеспечивают подтверждаемые сравнительными измерениями на ускорителях ионов достоверность, экономическую эффективность, доступность и радиационную безопасность лазерных испытаний.

Список основных работ по теме диссертации

1. Mavritskii O.B., Egorov A.N., Pechenkin A.A., Chumakov A.I., Savchenkov D.V., *"The laser-only single-event effects test method for space electronics based on ultrashort-pulsed-laser "local irradiation"*, 2018, "Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering", v. 10522, pp. 10522-S1-11, doi: 10.1117/12.2288364
2. Mavritskii O.B., Chumakov A.I., Egorov A.N., Pechenkin A.A., Nikiforov A.Y., *"Laser equipment for hardness evaluation of semiconductor elements exposed to heavy charged particles (Review)"*, 2016, "Instruments and Experimental Techniques", v. 59 (5), pp. 627-649, doi: 10.1134/S0020441216050122
3. Popova E.V., Buzhan P.Z., Stifutkin A.A., Ilyin A.L., Mavritskii O.B., Egorov A.N., Nastulyavichius A.A., *"Application of ultrashort laser pulses for timing characterization of silicon photomultipliers"*, 2016, "Journal of Physics: Conference Series", v. 737, (1), p. 012041, doi: 10.1088/1742-6596/737/1/012041
4. Pechenkin A.A., Savchenkov D.V., Mavritskii O.B., Chumakov A.I., Bobrovskii D.V., *"Evaluation of sensitivity parameters for single event latchup effect in CMOS LSI ICs by pulsed laser backside irradiation tests"*, 2015, "Russian Microelectronics", 44 (1), pp. 33-39, doi: 10.1134/S1063739715010072
5. Gordienko A.V., Mavritskii O.B., Egorov A.N., Pechenkin A.A., Savchenkov D.V., *"Ultrashort pulsed laser tools for testing of semiconductor elements hardness to single event effects, caused by cosmic heavy charged particles"*, 2015, "Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering", v. 9355, p. 93551C, doi: 10.1117/12.2079758

6. Mavritskii O.B., Egorov A.N., Nastulyavichus A.A., Pechenkin A.A., Smirnov N.A., Chumakov A.I., *"NIR Microscopy Possibilities for the Visualization of Silicon Microelectronic Structure Topology through the Substrate"*, 2015, "Physics Procedia", v. 73, pp. 183-188, doi: 10.1016/j.phpro.2015.09.152
7. Egorov A.N., Chumakov A.I., Mavritskiy O.B., Pechenkin A.A., Savchenkov D.V., Telets V.A., Yanenko A.V., *"Femtosecond laser simulation facility for SEE IC testing"*, 2014, "IEEE Radiation Effects Data Workshop", "2015-January", "January", p. 7004570, doi: 10.1109/REDW.2014.7004570
8. Novikov A.A., Pechenkin A.A., Chumakov A.I., Akhmetov A.O., Mavritskii O.B., *"SEE Laser Testing at Different Temperatures"*, 2015, "Proceedings of the European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems, RADECS", p.7365661, WOS:000380404200087
9. Gordienko A.V., Mavritskii O.B., Egorov A.N., Pechenkin A.A., Savchenkov D.V., *"Correlation of the ionisation response at selected points of IC sensitive regions with SEE sensitivity parameters under pulsed laser irradiation"*, 2014, "Quantum Electronics", v. 44 (12), pp. 1173-1178, doi: 10.1070/QE2014v044n12ABEH015519
10. Savchenkov D.V., Chumakov A.I., Petrov A.G., Pechenkin A.A., Egorov A.N., Mavritskiy O.B., Yanenko A.V., *"Study of SEL and SEU in SRAM using different laser techniques"*, 2013, "Proceedings of the European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems, RADECS", p. 6937411, doi: 10.1109/RADECS.2013.6937411
11. Egorov A.N., Chumakov A.I., Mavritskiy O.B., Pechenkin A.A., Koltsov D.O., Yanenko A.V., *"PICO-4 single event effects evaluation and testing facility based on wavelength tunable picosecond laser"*, Workshop record of 2012 IEEE Radiation Effects Data Workshop, 2012, p. 69-72, doi: 10.1109/REDW.2012.6353726
12. Chumakov A.I., Pechenkin A.A., Egorov A.N., Mavritsky O.B., Baranov S.V., Vasil'ev A.L., Yanenko A.V., *"Estimating IC susceptibility to single-event latchup"*, 2008, "Russian Microelectronics", v. 37 (1), pp. 41-46, doi: 10.1007/s11180-008-1005-2
13. Nechaev A.V., Mavritsky O.B., Egorov A.N., Skorobogatov P.K., *"Study of ionization response of semiconductor structures under laser irradiation in wavelength range 850-1064 nm"*, 2006, "Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics", v. 70 (9), pp. 1498-1502
14. Skorobogatov P.K., Nikiforov A.Y., Mavritsky O.B., Egorov A.N., Kirgizova A.V., *"Influence of temperature on pulsed laser SEE testing"*, 2004, "European Space Agency, (Special Publication) ESA SP", v. 536 (BP4), pp. 153-155
15. Chumakov A.I., Egorov A.N., Mavritskij O.B., Yanenko A.V., *"Evaluation of moderately focused laser irradiation as a method for simulating single-event effects"*, 2004, "Mikroelektronika", v. 33 (2), pp. 137-143