

На правах рукописи

САВЧЕНКОВ ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**РАЗВИТИЕ ЛАЗЕРНЫХ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЙ ИНТЕГРАЛЬНЫХ  
СХЕМ НА СТОЙКОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ОТДЕЛЬНЫХ ЯДЕРНЫХ  
ЧАСТИЦ**

05.13.05 - Элементы и устройства вычислительной техники  
и систем управления

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

Автор:



Москва – 2014 г.

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ».

Научный руководитель      Доктор технических наук, профессор  
Чумаков Александр Иннокентьевич

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор,  
главный научный сотрудник Секции прикладных  
проблем при Президиуме РАН.  
Помазан Юрий Викторович,  
кандидат технических наук, научный сотрудник  
НИИСИ РАН.  
Горбунов Максим Сергеевич

Ведущая организация:      ОАО "Корпорация "Комета"

Защита состоится 13 октября 2014 г. в 16 час. 30 мин.

На заседании диссертационного совета Д212.130.02

в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

по адресу: 115409 Москва, Каширское шоссе, 31, тел. 324-84-98, 323-91-76

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ

Автореферат разослан 11 июля 2014 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

## **Введение. Общая характеристика работы.**

**Диссертация направлена** на решение актуальной научно-технической задачи по совершенствованию и развитию методов и аппаратно-программных средств лазерных испытаний полупроводниковых элементов вычислительной техники и систем управления на стойкость к воздействию отдельных ядерных частиц (ОЯЧ) и протонов космического пространства (КП).

### **Актуальность темы диссертации**

В настоящее время сроки активного существования космических аппаратов во многих случаях определяются стойкостью элементной базы устройств вычислительной техники и систем управления бортовой аппаратуры к воздействию отдельных ядерных частиц и протонов космического пространства.

Основным средством для оценки стойкости интегральных схем (ИС) к воздействию отдельных ядерных частиц (ОЯЧ) космического пространства (КП) являются ускорители ионов и протонов, которые, тем не менее, имеют ряд существенных недостатков. Лазерные испытания наряду с ними позволяют существенно расширить информативность результатов, а в ряде случаев являются единственным средством оценки стойкости элементов систем управления, например, в случае ИС, изготовленных по технологии flip-chip.

Помимо сечения одиночных эффектов (ОЭ) и пороговых значений линейных потерь энергии (ЛПЭ) их возникновения, лазерные методы позволяют получать информацию о координатах и размерах областей возникновения ОЭ на кристалле ИС, вольтамперные характеристики отдельных тиристорных структур, факт сохранения либо не сохранения работоспособности ИС в состоянии ТЭ и пр.

При этом лазерные испытания являются трудоемким процессом, включающим следующие типовые процедуры:

- поиск наиболее чувствительных по ОЭ областей, т. е. областей с наименьшей пороговой энергией ОЭ;
- определение зависимостей пороговой энергии лазерного излучения (ЛИ) для возникновения ОЭ от диаметра пятна ЛИ;
- определение зависимостей параметров импульса ионизационной реакции от параметров ЛИ при воздействии на ИС, включенную в т. н. «режиме фотодиода»;
- определение зависимости сечения ОЭ от энергии ЛИ;
- исследование сохранения работоспособности ИС при выдержке в состоянии ТЭ;

К началу работы над диссертацией все эти процедуры выполнялись испытателем вручную, что занимало большое количество времени и приводило к затягиванию сроков испытаний. Поэтому актуальной задачей являлось повышение их эффективности (сокращение времени испытаний, использование оптимальной длины волны и ряда других характеристик лазерного излучения) за счет автоматизации перечисленных выше процедур лазерных испытаний, совершенствования методического аппарата, введения новых способов и алгоритмов воздействия и т.п.

### **Состояние исследований по проблеме**

В России и за рубежом широко применяются лазерные методы для проведения экспериментальных исследований по оценке чувствительности ИС к эффектам воздействия ОЯЧ. За рубежом лазерные методы представлены в работах авторов S. Buecher, P. Fouillat, V. Pouget, D. McMorrow, F. Miller, A. Chugg и других, в России – в работах А. И. Чумакова, П. К. Скоробогатова, А. А. Печенкина, А. Н. Егорова, О. Б. Маврицкого, А. В. Яненко. Отметим, что за рубежом применяется в основном методика сфокусированного лазерного воздействия. В работах отечественных авторов помимо сфокусированного применяется также т. н. локальное лазерное воздействие.

На момент начала работы производительность лазерных испытаний в отечественных исследованиях была невысока в виду отсутствия автоматизации процесса испытаний по методике локального лазерного воздействия. Отсутствовал механизм привязки координат областей возникновения ОЭ к конкретной топологии ИС и механизм мониторинга возникновения одиночных эффектов, что крайне затрудняло также и испытания с использованием методики сфокусированного лазерного воздействия. Кроме того не был решен ряд методических и технических задач, которые кратко сводятся к следующим:

- выбор оптимальных параметров (энергии, диаметра пятна, длины волны и длительности импульса) лазерного излучения, при которых исследования ОЭ дают максимально адекватные результаты;
- учет неравномерности распределения по поверхности кристалла величины коэффициента оптических потерь лазерного излучения, влияющей на корректность определения наиболее чувствительных областей и корректность оценки сечения ОЭ;
- экспериментальное определение распределения интенсивности излучения внутри лазерного пятна, необходимое при оценках параметров чувствительности ИС по ОЭ;

- устранение систематической погрешности определения сечения ОЭ, обусловленной ненулевыми размерами лазерного пятна;
- привязка координат возникновения ОЭ к топологии ИС.

Решению этих задач посвящена диссертация.

**Цель диссертации:** развитие научно-методических и аппаратно-программных средств проведения лазерных экспериментальных исследований и испытаний ИС на стойкость к воздействию ОЯЧ КП, обеспечивающих повышение производительности испытаний и достоверности их результатов.

Основными задачами диссертации являются:

1. Разработка программных и методических средств для оценки распределения коэффициента оптических потерь по площади кристалла ИС и учета данного распределения при оценке параметров чувствительности ИС к воздействию ОЯЧ лазерными методами.
2. Совершенствование научно-методического обеспечения проведения лазерных экспериментальных исследований и испытаний с учетом выбора оптимальных параметров (энергия, диаметр пятна, длина волны и длительность импульса) лазерного излучения для структур с многослойной металлизацией.
3. Разработка аппаратно-программных средств, обеспечивающих повышение производительности и достоверности результатов на всех этапах лазерных испытаний, имеющих гибкую модульную структуру, с возможностью взаимодействия отдельных компонентов программного обеспечения по локальной сети.
4. Разработка методики коррекции сечений ОЭ учитывающей влияние ненулевых размеров лазерного пятна сфокусированного лазерного излучения.
5. Апробация разработанных научно-методических и аппаратно-программных средств путем применения их в испытаниях ИС.

**Научная новизна работы** состоит в следующем:

1. Разработаны методические средства и программное обеспечение для получения карты распределения величины коэффициента оптических потерь лазерного излучения по площади кристалла ИС и учета этого распределения при оценке параметров чувствительности ИС к воздействию ОЯЧ лазерными методами.
2. Предложен алгоритм выбора оптимальных параметров лазерного излучения (энергия, диаметр пятна, длина волны и длительность импульса) для исследования ОЭ в структурах с многослойной металлизацией.

3. Разработана методика коррекции получаемых значений сечений ОЭ, учитывающая ненулевые размеры пятна сфокусированного лазерного излучения.

**Практическая значимость работы:**

1. Разработаны аппаратно-программные средства, автоматизирующие все этапы лазерных испытаний, на порядок и более снижающие их трудоемкость. Получены 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.
2. Проведены лазерные испытания более 100 типов современных ИС и БИС с многослойной металлизацией.
3. Результаты диссертации вошли в отчетные материалы по НИР и составным частям ОКР (14К035-ТЗЧ, ЛТ150-ТЗЧ, АСН-РМ-ИИКП, Перспектива-ТЗЧ, Энергия-1-ТЗЧ, Процессор ВСП-2, Цифра-3, БИВК-14Ф31-СВВ, Перспектива-ТЗЧ-СПЭЛС, Имперал), выполняемых в интересах Минобороны РФ, Росатома и предприятий оборонного комплекса (ГУП НПЦ «ЭЛВИС», ЗАО «ПКК Миландр», ЗАО НТЦ «Модуль», ОАО «НИИ КП», ОАО «РИРВ», ООО «ИРЗ ТЕСТ», ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», ФГУП ВО «Радиоэкспорт»)
4. Разработанные научно-методическое обеспечение и аппаратно-программные средства внедрены в ОАО «ЭНПО СПЭЛС», ОАО «НИИКП», ЗАО «МЦСТ».
5. Результаты диссертации внедрены в ОАО «ЭНПО СПЭЛС» при проведении радиационных испытаний отечественных и зарубежных ИС, комплектующих бортовую аппаратуру, на стойкость к факторам космического пространства в аппаратуре изделий 14Ф142, 14Ф148, Спектр-РГ, 14Ф137, KazSat-2, ЛТ150, Резонанс, 14В120, 14Р736, ФСЧ-Б, Эльбрус-2С+, АРТ ХС, БИВК КА 14Ф31, Луч-5В.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Усовершенствованный метод определения зависимости сечения одиночных эффектов от величины эффективных линейных потерь энергии лазерного излучения, учитывающий неравномерность распределения по кристаллу коэффициента оптических потерь излучения на металлизации, основанный на получении карт пороговой энергии ОЭ и амплитуды импульса ионизационной реакции ИС при воздействии на нее в режиме «фотодиода».
2. Алгоритм выбора оптимальных параметров лазерного излучения для исследования конкретных одиночных эффектов, позволяющий проводить испытания ИС с четырьмя и более слоями металлизации.

3. Методика корректировки сечения одиночных сбоев при проведении лазерных испытаний, основанная на модели прямоугольной чувствительной области, позволяющая снизить погрешность определения сечения ОЭ, связанную с ненулевыми размерами лазерного пятна.
5. Аппаратно-программные средства, обеспечивающие увеличение производительности лазерных испытаний и достоверности их результатов, имеющие гибкую модульную структуру с возможностью взаимодействия отдельных компонентов программного обеспечения по локальной сети.
6. Оригинальные результаты экспериментальных исследований более 100 типов ИС.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались на:

- российских научных конференциях “Радиационная стойкость электронных систем” (Лыткарино, 2011-2014 гг.);
- международных конференциях по радиационным эффектам в компонентах и системах (The Conference on Radiation Effects on Components and Systems – RADECS) (Севилья 2011 г., Биарриц 2012 г., Оксфорд 2013 г.);
- V Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем МЭС-2012» (Москва, 2012);
- научных сессиях НИЯУ «МИФИ» (Москва, 2011-2014 гг.);
- научных конференциях “Электроника, микро- и наноэлектроника” (г. Суздаль, 2012-2013 гг.);
- 14-й международной телекоммуникационной конференции молодых ученых и студентов «Молодежь и наука», Москва 2010;

Основные результаты диссертации опубликованы в 28 работах (в период с 2010 по 2014 гг.), в том числе в 7 журналах из перечня ВАК.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация содержит 137 страниц, в том числе 89 рисунков, 9 таблиц, список литературы из 72 наименований и состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка литературы.

### **Содержание диссертации**

**Введение** обосновывает актуальность работы, обобщает краткие результаты анализа ранее выполненных научных работ по тематике.

**Первая глава** посвящена сравнительному анализу методик испытаний ИС на ускорителях ионов и лазерных импульсных источниках ионизирующего излучения (ИИ). Пред-

ставлен обзор методик сфокусированного и локального лазерного воздействия. Сформулированы методические проблемы лазерных испытаний.

Общепринятым методом испытаний ИС на стойкость к воздействию ОЯЧ являются испытания на ускорителях ионов, которым присущи такие недостатки как:

- необходимость устанавливать объект испытаний в вакуумную камеру;
- длинные провода, соединяющие часть оснастки, расположенную внутри и вне ускорительного зала;
- малые пробеги ионов в подложке ИС делают невозможными испытания ИС с перевернутыми кристаллами;
- наличие дозовых эффектов;
- опасность затенения объекта испытаний при облучении под углом;
- пространственная неоднородность пучка ионов;
- наличие т. н. мертвого времени при облучении, в течение которого ИС находится в выключенном состоянии, а накопленный за это время флюенс оказывается недействительным;
- проблема многократных сбоев, которые приводят к завышению оценок частоты событий;
- отсутствие информации о локализации одиночных эффектов на кристалле ИС;
- ограниченность набора доступных значений ЛПЭ ионов.

Альтернативными и/или дополняющими являются лазерные методы испытаний, к недостаткам которых можно отнести следующие:

- природа лазерного излучения отлична от природы излучения в космосе;
- ионизационный трек лазерного излучения имеет поперечный размер от нескольких мкм, в отличие от треков ионов, имеющих размеры сотых долей микрона, при этом ненулевая величина диаметра лазерного пятна приводит к систематической погрешности в оценке сечения одиночных сбоев и невозможности непосредственного экспериментального определения пороговой энергии возникновения ОЭ в конкретной чувствительной области;
- непрозрачность металлизации ИС для лазерного излучения, которая прозрачна для ионов;

Можно сказать, что недостаток одного метода оборачивается достоинством другого. Поэтому в настоящее время применяются сразу оба метода, например, в методике сфокусированного лазерного воздействия.



Чувствительность ИС к воздействию ОЯЧ характеризуется зависимостью сечения ОЭ от ЛПЭ ионов. Экспериментальная зависимость аппроксимируется функцией Вейбулла. Часто зависимость сечения ОЭ от ЛПЭ, полученная на ускорителе ионов не позволяет достаточно точно подобрать параметры аппроксимации (рисунок 1.1а). В этом случае для получения дополнительных экспериментальных точек зависимости применяют сканирование ИС сфокусированным лазерным пучком, посредством чего можно получить зависимость сечения от энергии лазерного излучения (рисунок 1.1б). Чтобы уточнить зависимость сечения от ЛПЭ, проводят совмещение зависимостей, полученных на ускорителе и на лазере (рисунок 1в). В этом заключается существо методики сфокусированного лазерного воздействия.

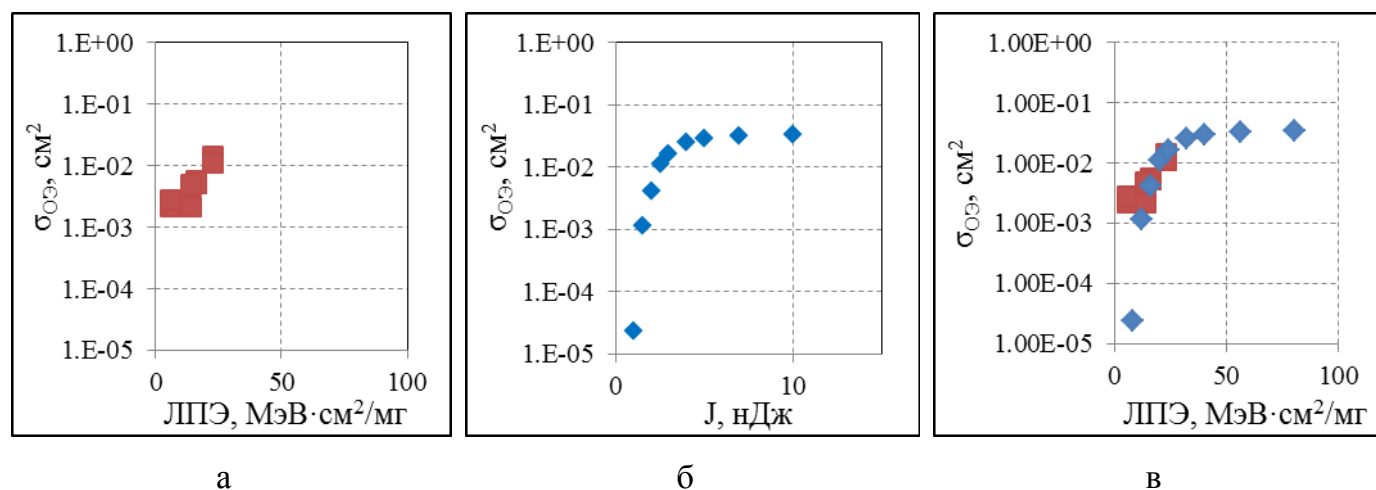


Рисунок 1.1 – Зависимости сечения от ЛПЭ при испытаниях на ускорителе ионов (а) и лазерной установке (б) СОЗУ СУ62256 ф. Сурpress и их совмещение на одном графике (в).

В методике локального лазерного воздействия используется расфокусированное лазерное излучение, т. е. диаметр лазерного пучка на поверхности кристалла ИС превышает минимально достижимый. Делается это в предположении, что расфокусированное лазерное излучение в отличие от сфокусированного может хотя бы частично пройти сквозь металлизацию ИС. Методика локального лазерного воздействия направлена на определение порогового значения ЛПЭ одиночного эффекта, которое оценивается по формуле:

$$LET = \alpha_0 \cdot (1 - R_\lambda) \cdot \frac{J_{ли}}{K_m} \cdot \frac{\epsilon_i}{h\nu} \cdot \frac{1}{\rho}, \quad (1.1)$$

где  $\alpha_0$  – коэффициент межзонного поглощения лазерного излучения;  $J_{ли}$  – энергия сфокусированного лазерного излучения;  $R_\lambda$  – коэффициент отражения от поверхности кристалла;  $K_m$  – коэффициент потерь лазерного излучения на оптических

неоднородностях;  $\rho$  – плотность полупроводника;  $\varepsilon_i$  – энергия образования одной электронно-дырочной пары (3.6 эВ в кремнии);  $h\nu$  – энергия кванта лазерного излучения.

Пороговые ЛПЭ возникновения ОЭ оцениваются только в т. н. наиболее чувствительных областях, т. е. областях с наименьшими пороговыми энергиями ЛИ для возникновения ОЭ. Для этого на первом этапе испытаний проводят серию сканирований кристалла ИС лазерным пятном с целью их поиска.

Чтобы определить коэффициент потерь  $K_m$  проводят следующий эксперимент: исследуемую ИС включают в т. н. режиме фотодиода, когда выводы ИС объединяются таким образом, чтобы сформировать два электрода диода, образуемого рп-переходом карман-подложка. При воздействии лазерного излучения в рп-переходе возникает импульс ионизационного тока, который затем интегрируется RC-цепью (рисунок 1.2а) и создает импульс напряжения на осциллографе (рисунок 1.2б) – импульс ионизационной реакции (ИР). Этот импульс зависит от энергии, выделяющейся в переходе, а она в свою очередь зависит от энергии лазерного импульса и искомого коэффициента оптических потерь  $K_m$ . Измерение импульса напряжения дает уравнение, из которого можно извлечь  $K_m$ .

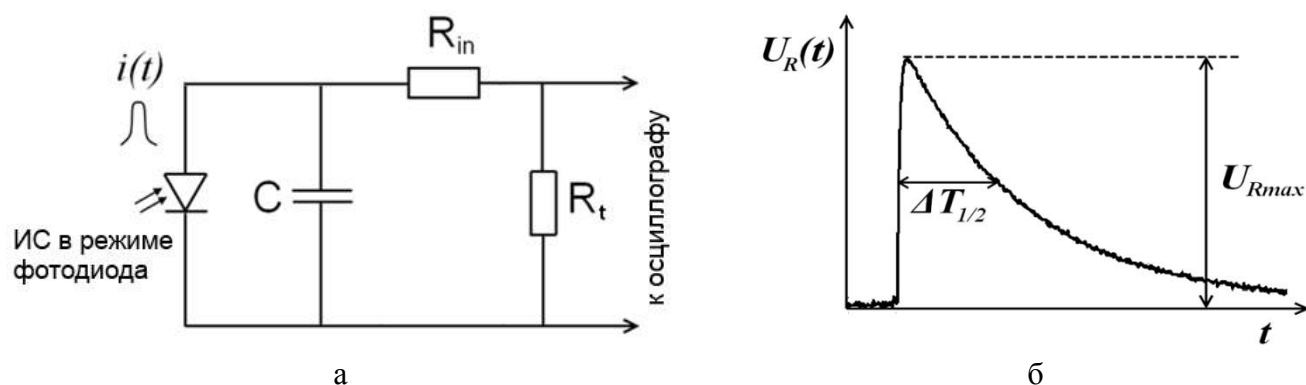


Рисунок 1.2 – (а) схема измерения ионизационного тока ИС в режиме фотодиода;

(б) форма импульса ионизационной реакции, наблюдаемая на осциллографе.

$R_{in}$  – внутреннее сопротивление ИС,  $C$  – суммарная емкость ИС и измерительной оснастки,  $R_t$  – сопротивление токосъемного резистора,  $U_{Rmax}$  – амплитуда импульса ионизационной реакции,  $\Delta T_{1/2}$  – длительность импульса ионизационной реакции на полувысоте.

**Во второй главе** предлагаются усовершенствования методики локального лазерного воздействия. Предложен метод поиска наиболее чувствительных областей и оценки сечений ОЭ с учетом неравномерности распределения оптических потерь по площади кристалла ИС, предполагающий получение карты распределения амплитуды импульса ИР при воздействии на ИС в режиме «фотодиода», а также карты пороговой энергии ОЭ. Приведены примеры подобных карт, полученных в ходе исследований. Предложены рекомендации по выбору оптимальных параметров лазерного излучения для исследования одиноч-

ных эффектов. Предложен метод уменьшения погрешности определения сечения одиночных сбоев, обусловленной ненулевыми размерами пятна лазерного излучения, основанный на использовании модели прямоугольной чувствительной области. Рассмотрены методические проблемы, возникающие при облучении со стороны подложки. Описан способ экспериментального измерения распределения интенсивности излучения внутри лазерного пучка с использованием метода «нож Фуко». Представлены экспериментальные результаты определения формы и диаметра пятна для различных лазерных источников.

*Учет неоднородности распределения величины оптических потерь по кристаллу ИС.* В традиционной методике локального облучения предполагается, что величина коэффициента оптических потерь  $K_m$  однородно распределена по кристаллу, поэтому эффективное значение ЛПЭ лазерного воздействия предполагается одинаковым во всех точках кристалла ИС. Однако проведенные автором исследования показали, что для ряда ИС отличия коэффициента потерь в различных областях кристалла могут достигать порядка и более. Учет неоднородности распределения  $K_m$  потребовал доработки методического аппарата, которая сводится к получению и использованию карт распределения амплитуды импульса ионизационной реакции (эта амплитуда обратно пропорциональна коэффициенту потерь  $K_m$ ) и пороговой энергии ОЭ (рисунок 1.3). Получение таких карт стало возможным в результате разработки и внедрения программного обеспечения, описанного в главе 3 диссертации.

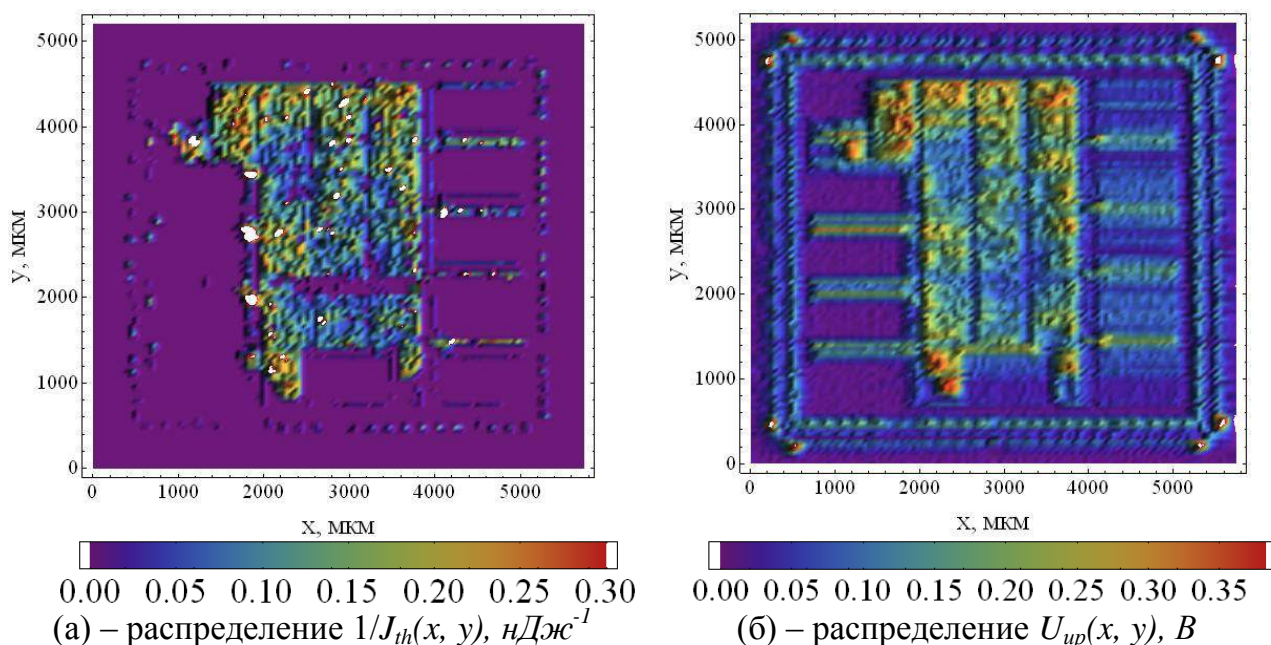


Рисунок 1.3 – распределение пороговой энергии ТЭ (а), амплитуды импульса ионизационной реакции (б) для ИС микропроцессора с проектными нормами 0.35 мкм.

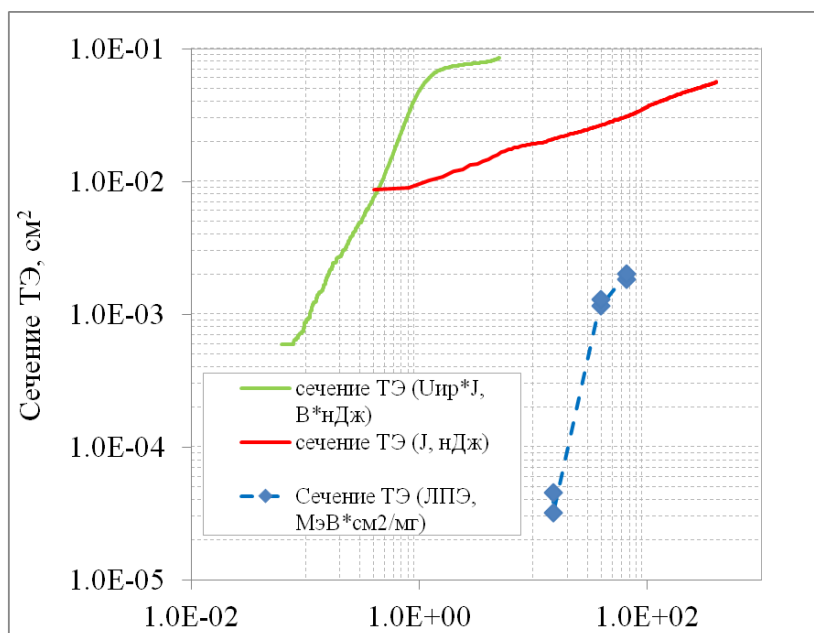


Рисунок 1.4 – Зависимость сечения ТЭ от ЛПЭ ионов, энергии ЛИ и произведения энергии ЛИ на амплитуду импульса ИР для ИС микропроцессора с проектными нормами 0.35 мкм.

На рисунке 1.4 на одном графике с логарифмическим масштабом по обеим осям приведены три зависимости: зависимость сечения ТЭ от ЛПЭ ионов, зависимость сечения ОЭ от энергии лазерного излучения и зависимость сечения ТЭ от произведения энергии ЛИ на амплитуду импульса ИР  $J \cdot U_{ip}$  (это произведение прямо пропорционально величине  $J/K_m$ , поэтому последняя из трех зависимостей учитывает потери лазерного излучения). Из рисунка 1.4 видно, что зависимость сечения от произведения  $J \cdot U_{ip}$ , учитывающая потери лазерного излучения, гораздо лучше коррелирует с зависимостью сечения от ЛПЭ ионов (т. е. эти две зависимости можно совместить путем сдвига по осям).

*Выбор оптимальных параметров лазерного излучения.* Формула (1.1) справедлива для ограниченного диапазона параметров лазерного излучения, в котором не проявляется влияние т. н. нелинейных эффектов таких как поглощение излучения свободными носителями заряда, двухфотонное поглощение, эффект самофокусировки лазерного пучка, эффект Бурштейна-Мосса и др. Влияние этих эффектов усиливается с повышением интенсивности излучения и уменьшением длины волны. Это приводит к необходимости определять диапазон допустимых длин волн, энергий и диаметров пятна ЛИ.

В работах [9] и [11] проводились оценки пороговых ЛПЭ различных ОЭ по методике локального лазерного воздействия (сводные данные представлены в таблице 2.1). Эти исследования показали, что для одних ИС оценки ЛПЭ оказываются корректными в широком диапазоне параметров ЛИ, для других адекватность оценок повышалась с уменьшени-

ем длины волны и длительности импульса. Например, использование лазерных импульсов длительностью 10 нс приводило при исследовании ОС в ОЗУ MMDJ-6560 к завышению пороговых ЛПЭ в 4-5 раз по сравнению с оценками для импульсов длительностью 25 и 70 пс.

Данные исследования позволяют сформулировать алгоритм выбора длины волны и длительности импульса ЛИ при проведении испытаний. При исследовании ТЭ следует выбирать величину длительности импульса не более 10 нс, при исследовании ОС – ~10 пс. Облучение следует начинать с длины волны 1064 нм. Если ОЭ не удастся вызвать при энергии близкой к порогу разрушения металлизации для выбранного диаметра, следует уменьшать длину волны ЛИ, пока одиночный эффект не возникнет.

Таблица 2.1 – Зависимость оценки порогового ЛПЭ ОЭ от длины волны и длительности импульса ЛИ. ЛПЭ в МэВ·см<sup>2</sup>/мг.

Источник ИИ	Длина волны, нм	Длительность импульса, нс	DDC AMI <sub>R</sub>	СОЗУ MMDJ-6560	СОЗУ CY62256	СОЗУ CY62256	ОУ AD829JRZ
			ЛПЭ ТЭ	ЛПЭ ОС	ЛПЭ ТЭ	ЛПЭ ОС	ЛПЭ SET
РАДОН-9Ф	1064	10	10...20	19...20			
ПИКО-3	1064	0.070	10...20	4.4...4.7	60...100*	100...150*	4...6
ПИКО-4	1000	0.025		3.4...5.3	30...120	30	8...30
ПИКО-4	950		8...11	3.3...4.1			
ПИКО-4	900	0.025			35...100	23...24	0.3...20
ПИКО-4	850	0.025	10...13	2.4...3.5	35...90	20...23	0.2...20
ФЕМТО-1	870	0.00025				23	
Ускоритель ионов	-	-	12...15	<15	6...14	<6	<6

\* Воздействие со стороны подложки

Наличие нелинейных эффектов приводит к необходимости определять для каждой испытываемой ИС диапазон энергий и диаметров лазерного пятна, при котором зависимость амплитуды импульса ионизационной реакции от энергии  $\Delta U(J)$  линейна, а длительность импульса ИР  $\Delta T_{1/2}$  не зависит от энергии. Пример определения этого диапазона для ИС ОЗУ 537РУ6, изготовленной по 2-микронной КМОП технологии, приведен на рисунке 2.1. Видно, что отсутствия нелинейности удалось достичь только при смещении  $Z = -480$  мкм, что соответствует диаметру лазерного пятна 400 мкм.

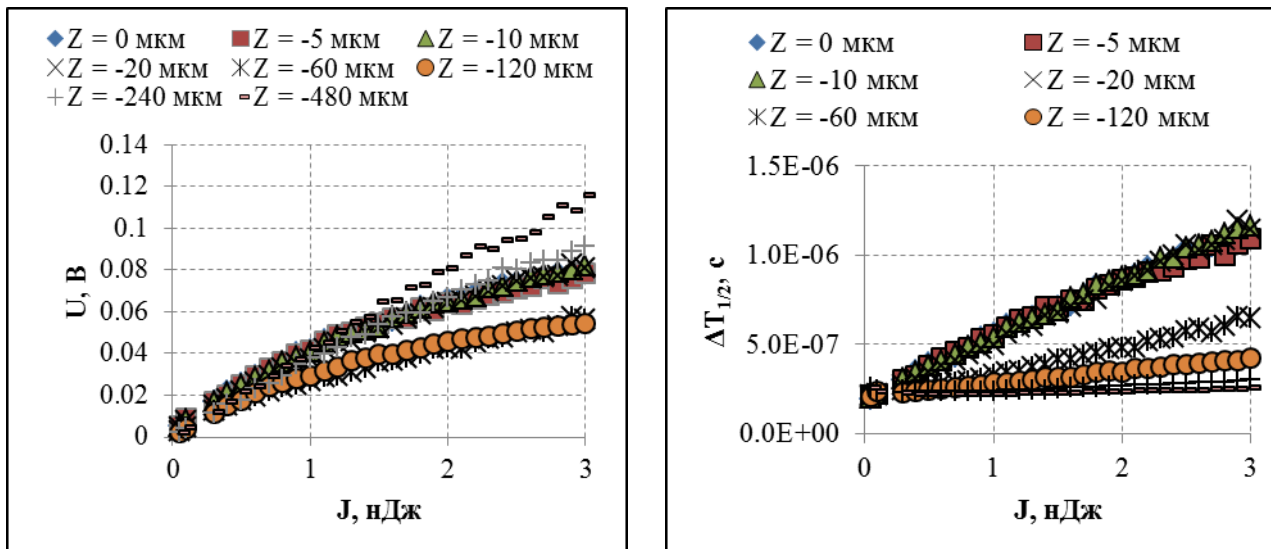


Рисунок 2.1 – Зависимость амплитуды и длительности импульса ионизационной реакции при облучении фотодиода ОЗУ 537РУ6 от энергии ЛИ и смещения по вертикали из плоскости фокусировки. Длина волны ЛИ 900 нм, длительность лазерного импульса 25 пс.

*Корректировка сечения одиночных сбоев.* Диаметр трека иона в кремнии составляет сотые доли мкм, лазерное же пятно имеет диаметр не менее 2.5 мкм, поэтому в оценках сечения ОЭ с лазерными методами может возникать погрешность, которая может выражаться как в завышении, так и в занижении величины сечения, в зависимости от соотношения между пороговой энергией ОЭ и энергией лазерного импульса  $J_{th} / J_{обл}$  (рисунок 2.2).

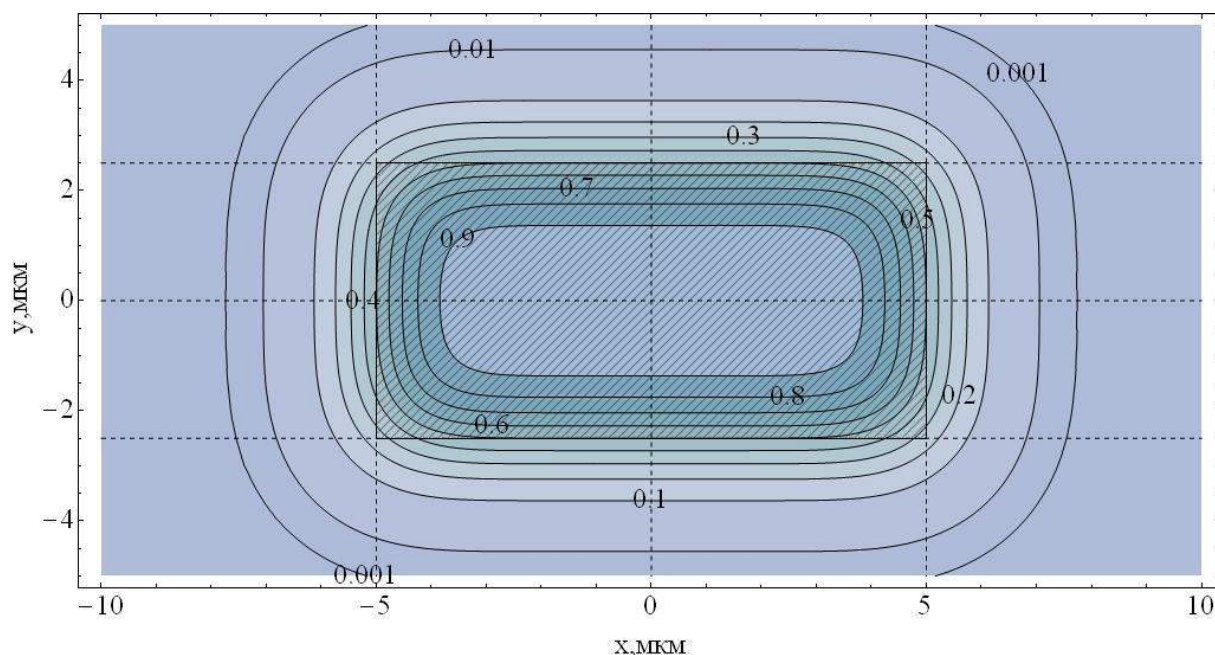


Рисунок 2.2 – Прямоугольная чувствительная область размером 5×10 мкм (заштрихована) и контуры сечений ОЭ при различных величинах соотношения  $J_{th} / J_{обл}$  (диаметр пятна 2.5 мкм).



Величину завышения либо занижения сечения ОЭ, для конкретной чувствительной области можно рассчитать, зная геометрические параметры области, а также энергию лазерного импульса и диаметр лазерного пятна. Энергия, выделяющаяся в чувствительной области при лазерном воздействии, определяется следующей формулой:

$$I_{обл} = \int_{-b/2}^{+a/2} dx \int_{-b/2}^{+a/2} dy \frac{4 \cdot J_{ли}}{\pi \cdot d^2} \exp\left(-4 \frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{d^2}\right) \quad (2.1)$$

$$= \frac{J_{ли}}{4} \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{a - 2x_0}{d}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{a + 2x_0}{d}\right) \right] \cdot \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{b - 2y_0}{d}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{b + 2y_0}{d}\right) \right],$$

где  $a$  и  $b$  – длина и ширина чувствительной области,  $J_{ли}$  – энергия лазерного импульса,  $d$  – диаметр лазерного пятна,  $x_0$  и  $y_0$  – координаты центра пятна.

Если приравнять  $J_{обл}$  и пороговую энергию ОЭ  $J_{th}$ , получим параметрическое уравнение  $F(x_0, y_0) = 0$  контура, ограничивающего сечение ОЭ чувствительной области:

$$F(x_0, y_0) = J_{th} - \frac{J_{ли}}{4} \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{a - 2x_0}{d}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{a + 2x_0}{d}\right) \right] \cdot \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{b - 2y_0}{d}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{b + 2y_0}{d}\right) \right] = 0, \quad (2.2)$$

На рисунке 2.2 показаны решения этого уравнения при различных значениях соотношения  $J_{th} / J_{обл}$ . Величина завышения сечения  $K_{завышения}$  при лазерном воздействии определяется как отношение площади ограниченной упомянутым контуром к площади чувствительной области. Автором была написана программа расчета величины завышения в зависимости от геометрических размеров чувствительной области, энергии лазерного импульса и диаметра лазерного пятна. Примеры расчетных зависимостей коэффициента завышения сечения ОЭ от этих параметров представлены на рисунке 2.3.

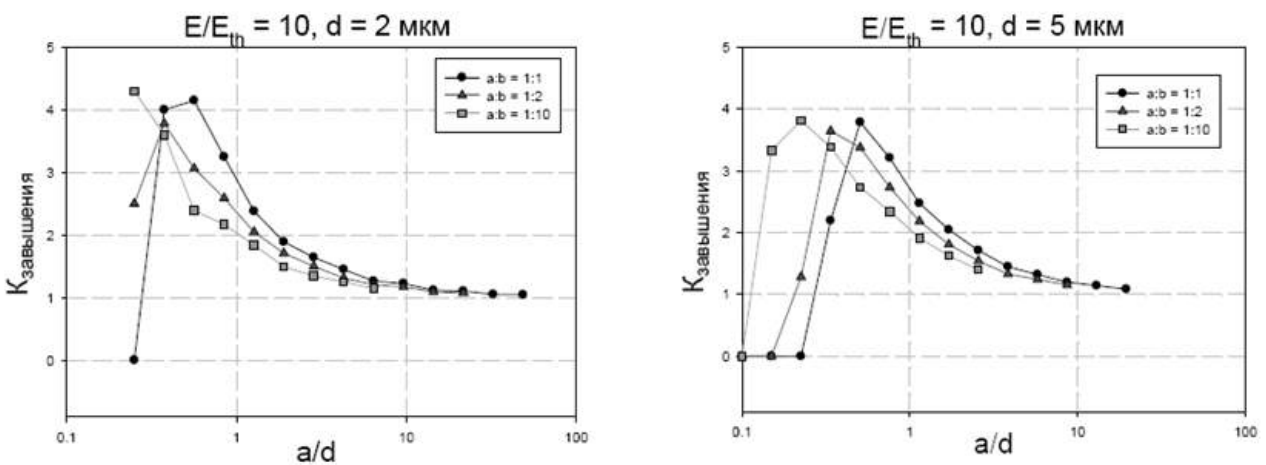


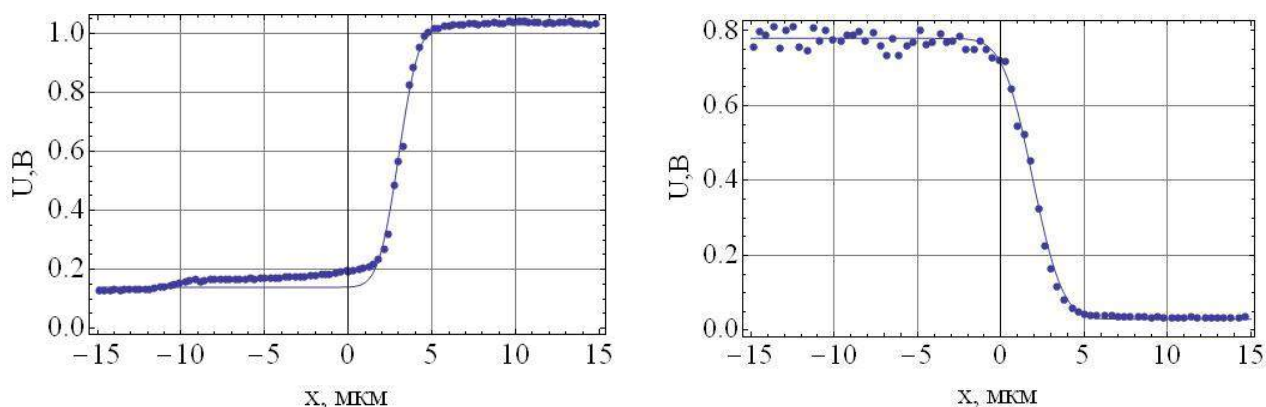
Рисунок 2.3 – Зависимости коэффициента завышения сечения от параметров  $d$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $J_{ли}$ .

*Измерение диаметра лазерного пятна. Нож Фуко.* При использовании методики локального лазерного облучения диаметр лазерного пятна задается смещением объекта испытаний по вертикали из плоскости фокусировки. Чтобы определить величину смещения  $Z$ , необходимую для получения заданного диаметра  $D$ , необходимо предварительно получить зависимость  $D(Z)$  экспериментально. На момент начала работы определение диаметра пятна при различных  $Z$  производилось с использованием майларовой пленки с напыленным на нее алюминием. Лазерный пучок прожигал в слое алюминия отверстие, диаметр которого и считался диаметром пятна. Разработанная автором программа позволила измерять диаметр пятна более строго с помощью метода известного как «нож Фуко». Метод заключается в сканировании лазерного пучка непрозрачной для лазера полуплоскостью, под которой находится чувствительный к излучению элемент (например, фотодиод). Энергия, выделяющаяся в чувствительном элементе, определяется интегралом от интенсивности лазерного излучения по полуплоскости:

$$I(x_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} dy \int_0^{+\infty} dx \frac{4J_{ли}}{\pi \cdot d^2} \exp\left(-4 \frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{d^2}\right) = \frac{J_{ли}}{2} \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{2x_0}{d}\right)\right], \quad (2.3)$$

где  $x_0$  – расстояние от границы полуплоскости до центра лазерного пятна.

Этой функцией аппроксимируется экспериментальная зависимость амплитуды импульса напряжения на фотодиоде от смещения центра лазерного пятна относительно полуплоскости. Одним из параметров аппроксимации является диаметр пятна. Примеры зависимостей амплитуды импульса на фотодиоде от взаимного положения лазерного пятна и полуплоскости и их аппроксимаций показаны на рисунке 2.4.



ПИКО-3 объектив x20 1064 нм  $D=2.7$  мкм    ПИКО-4 объектив x100 800 нм  $D=4$  мкм

Рисунок 2.4 – Зависимости амплитуды импульса, регистрируемого блоком контроля лазерного излучения (БКЛИ), от координаты центра лазерного пятна.



**Третья глава** посвящена решению задачи разработки программного обеспечения, автоматизирующего лазерные испытания. Глава содержит описание аппаратной части комплекса для проведения лазерных испытаний, постановку задачи их автоматизации и описание алгоритмов работы модулей разработанного автором приложения, осуществляющего автоматизацию каждого из этапов испытаний.

Аппаратно-программный комплекс для проведения лазерных испытаний состоит из разнородного оборудования, показанного на рисунке 3.1. В разработанном приложении каждый прибор в составе комплекса имеет визуальный и программный интерфейс, который одинаков для приборов различных производителей и моделей, выполняющих одинаковые функции (в реальном лабораторном комплексе имеется несколько различных моделей осциллографов, мультиметров и источников питания).

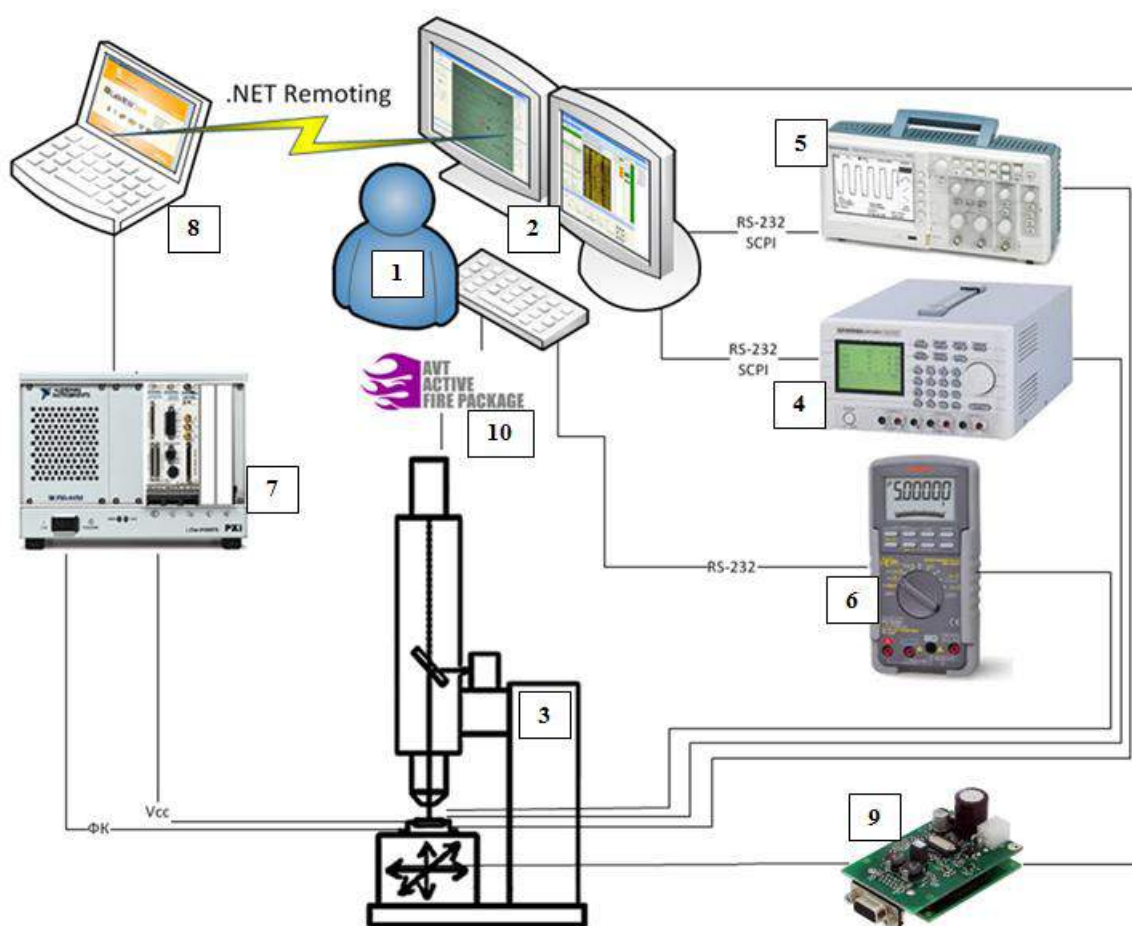


Рисунок 3.1 – Типичная схема аппаратно-программного комплекса для проведения лазерных испытаний ИС на стойкость к воздействию ОЯЧ.

1 – испытатель; 2 – ПК, за которым работает испытатель; 3 – лазерный имитатор; 4 – источник питания; 5 – осциллограф; 6 – мультиметр; 7 – крейт National Instruments; 8 – ноутбук, управляющий крейтом NI; 9 – контроллер шаговых двигателей; 10 – интерфейс видеокамеры ф. Allied Vision Technologies.

Приложение имеет модульную структуру, поддерживающую добавление новых приборов и новых алгоритмов испытаний, причем отдельные модули могут выполняться на различных ЭВМ, связанных локальной сетью. Для взаимодействия по сети используется технология .NET Remoting. Приложение построено на платформе Microsoft .NET. Его графический интерфейс показан на рисунке 3.2.

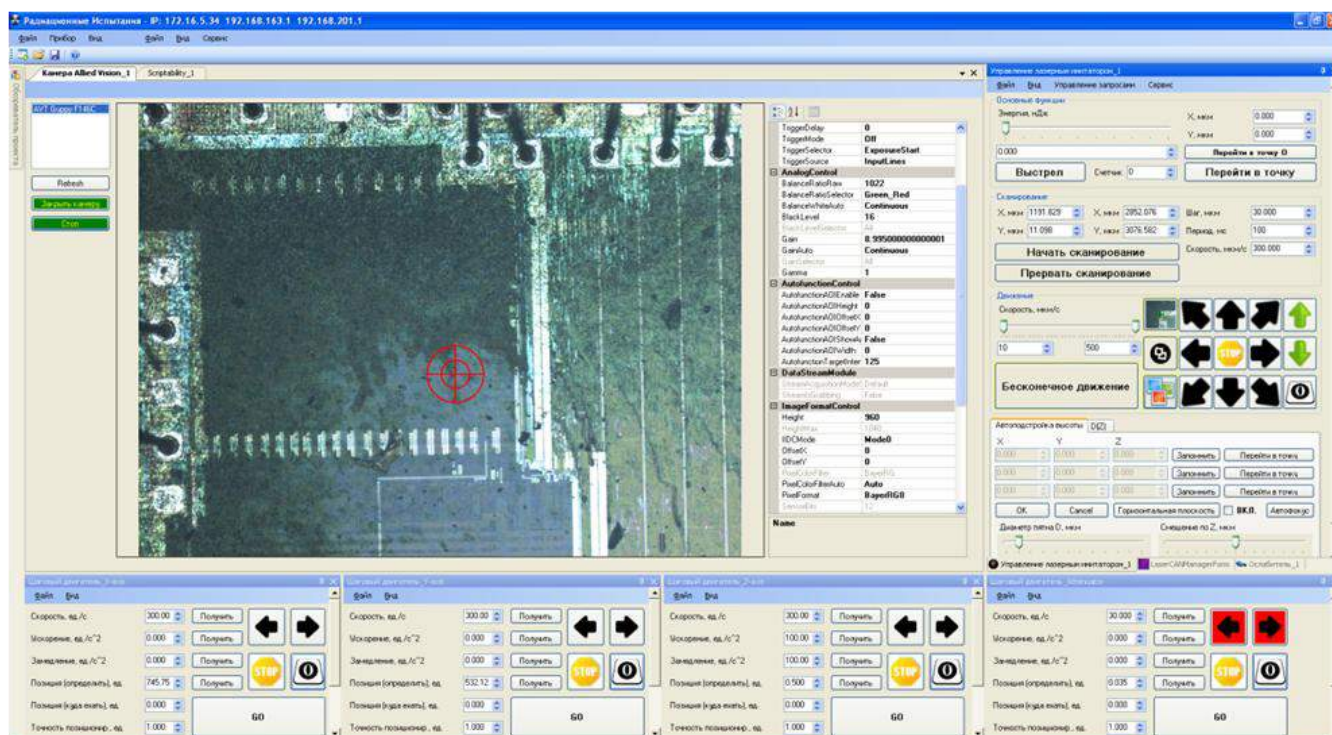


Рисунок 3.2 – Графический интерфейс приложения автоматизации лазерных испытаний.

Приложение автоматизирует этапы лазерных испытаний в соответствии с алгоритмами, примеры которых представлены ниже. На рисунке 3.3 показан алгоритм поиска заданного числа  $N$  наиболее чувствительных по ОЭ областей.

Поиск заданного числа  $N$  наиболее чувствительных областей эквивалентен численному решению уравнения

$$N_{OЭ}(J) - N = 0, \quad (3.1)$$

В качестве метода численного решения уравнения была выбрана комбинация метода дихотомии и метода секущих. На первом этапе производятся два цикла сканирования с различными энергиями ЛИ  $J_1$  и  $J_2$ . В результате получается два значения количества ОЭ  $N_1$  и  $N_2$ . Очередное  $(i+1)$ -е значение энергии сканирования определяется псевдокодом, приведенным в листинге 3.1.

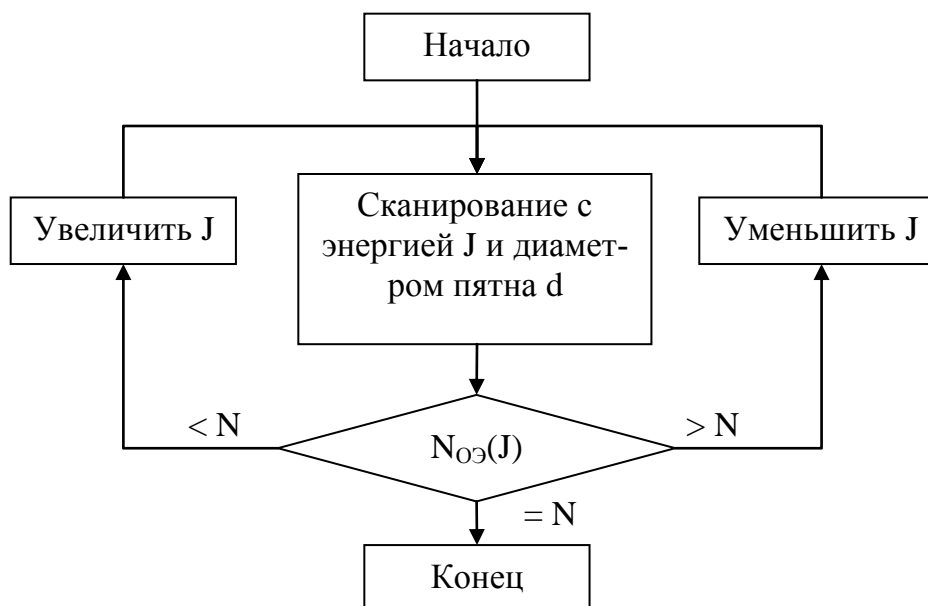


Рисунок 3.3 – Алгоритм поиска заданного числа  $N$  наиболее чувствительных областей.  $J$  – энергия ЛИ,  $d$  – диаметр пятна,  $N_{OЭ}(J)$  – число чувствительных ОЭ, выявленных при сканировании с энергией  $J$ .

Листинг 3.1 – Алгоритм поиска наиболее чувствительных по ОЭ областей

```

if( $N_i == N$ ) return; // если число найденных областей равно  $N$ , то поиск завершен
if( $N_i - N_{i-1} \neq 0$ ) // если число найденных на  $i$ -й итерации областей не совпадает
    // с числом областей, найденных на  $(i-1)$ -й итерации
{
    if ( $\frac{(N_i - N)J_{i-1} - (N_{i-1} - N)J_i}{N_i - N_{i-1}} > 0$ ) // если метод секущих дает положительное
    // значение энергии, то применяем именно его
         $J_{i+1} = \frac{(N_i - N)J_{i-1} - (N_{i-1} - N)J_i}{N_i - N_{i-1}}$ ;
    else // в противном случае применяем метод дихотомии
         $J_{i+1} = \frac{\min(J_i, J_{i-1})}{2}$ ;
}
else // если число найденных на  $i$ -й итерации областей совпадает
    // с числом областей, найденных на  $(i-1)$ -й итерации
{
    if( $N_i - N > 0$ )
         $J_{i+1} = \frac{\min(J_i, J_{i-1})}{2}$ ;
    else if( $N_i - N < 0$ )
         $J_{i+1} = \frac{(N_i - N)J_k - (N_k - N)J_i}{N_i - N_k}$ ; //  $N_k$  – наименьшее из всех ранее полученных значений
    //  $N_j > N$ ;  $J_k$  – энергия, соответствующая числу ОЭ  $N_k$ 
}
  
```

Сканирование кристалла ИС с целью поиска наиболее чувствительных областей производится при расфокусированном лазерном пучке, поэтому по завершении поиска координаты наиболее чувствительных областей известны с точностью до диаметра лазерного

пятна. Чтобы их уточнить проводят дополнительные сканирования окрестностей найденных областей, итерационно уменьшая диаметр пятна, пока чувствительная область не будет локализована при сканировании сфокусированным пучком. Алгоритм этого процесса показан на рисунке 3.4.

После того как наиболее чувствительные области найдены в них снимаются зависимости пороговой энергии ОЭ от диаметра лазерного пятна. Затем исследуемая ИС включается в режиме фотодиода и производится измерение импульса ионизационной реакции. Алгоритмы этих и других процессов приведены в тексте диссертации.

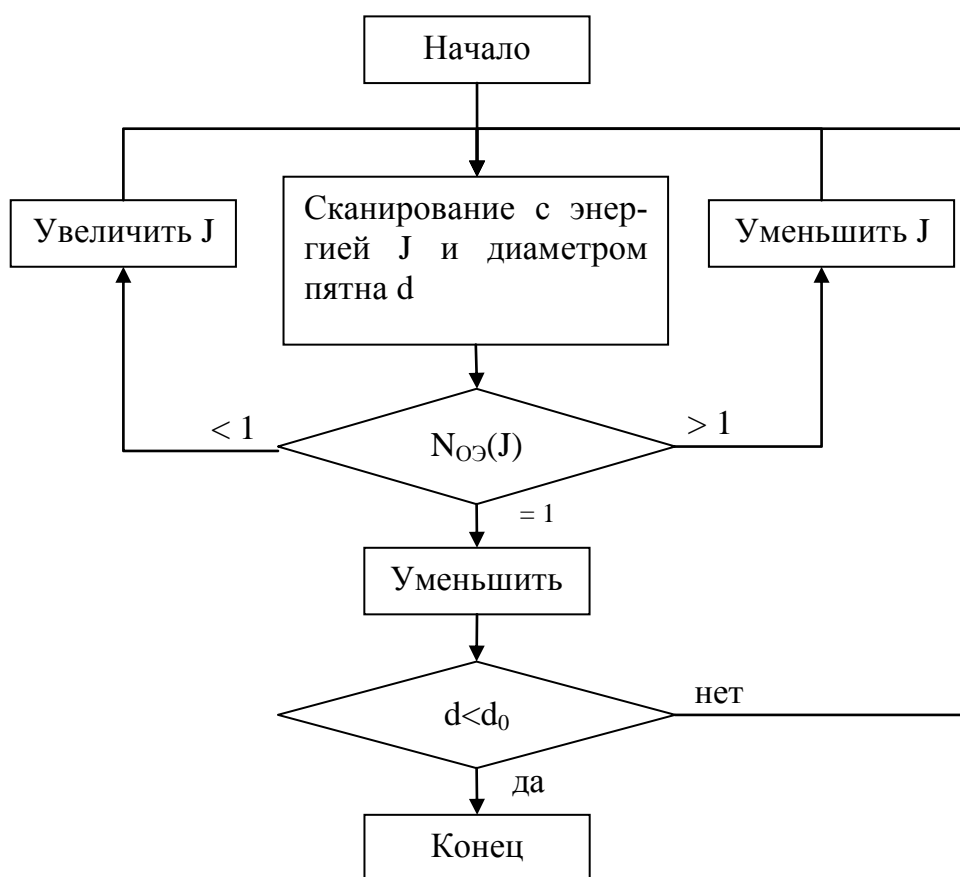


Рисунок 3.4 – Алгоритм локализации чувствительной области.

$J$  – энергия ЛИ,  $d$  – диаметр пятна,  $d_0$  – диаметр сфокусированного пучка,  $N_{OЭ}(J)$  – число чувствительных ОЭ, выявленных при сканировании с энергией  $J$ .

**В четвертой главе** приведены результаты апробации разработанных методических и аппаратно-программных средств. Приведены результаты испытаний ИС при воздействии со стороны подложки, результаты определения формы лазерного пятна методом «нож Фуко», а также статистика по результатам испытаний более 100 ИС.

**Заключение.** Основным результатом работы явилось повышение эффективности лазерных экспериментальных исследований и испытаний ИС на стойкость к воздействию

ОЯЧ КП за счет развития научно-методических и аппаратно-программных средств их проведения. Разработанные аппаратно-программные средства автоматизируют все этапы лазерных испытаний, на порядок и более снижая их трудоемкость. Также решены некоторые научно-методические задачи, возникающие в ходе лазерных испытаний. Разработанные аппаратно-программные средства и методики апробированы при испытаниях более 100 ИС. Таким образом, поставленная в работе цель развития методических и аппаратно-программных средств проведения лазерных испытаний достигнута.

#### **Основные научные результаты работы:**

1. Предложен метод определения зависимости сечения одиночных эффектов от эффективных ЛПЭ лазерного излучения, учитывающий неравномерность распределения по кристаллу коэффициента оптических потерь излучения на металлизации, позволяющий повысить достоверность оценки параметров чувствительности ИС к воздействию ОЯЧ лазерными методами.
2. Предложен и обоснован алгоритм выбора оптимальных параметров лазерного излучения для исследования ОЭ в структурах с многослойной металлизацией, что дало возможность повысить адекватность оценок параметров чувствительности ИС к воздействию ОЯЧ лазерными методами путем выбора параметров лазерного излучения.
3. Разработана методика коррекции получаемых значений сечений ОС, учитывающая ненулевые размеры пятна лазерного излучения, позволившая уменьшить погрешность экспериментального определения сечений ОС при проведении лазерных испытаний.

#### **Основные практические результаты работы:**

6. Разработаны аппаратно-программные средства, автоматизирующие все этапы лазерных испытаний, на порядок и более снижающие их трудоемкость. Получены 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.
7. Проведены лазерные испытания более 100 типов современных ИС и БИС с многослойной металлизацией.
8. Результаты диссертации вошли в отчетные материалы по НИР и составным частям ОКР (14К035-ТЗЧ, ЛТ150-ТЗЧ, АСН-РМ-ИИКП, Перспектива-ТЗЧ, Энергия-1-ТЗЧ, Процессор ВСП-2, Цифра-3, БИВК-14Ф31-СВВ, Перспектива-ТЗЧ-СПЭЛС, Имперал), выполняемых в интересах Минобороны РФ, Росатома и предприятий оборонного комплекса (ГУП НПЦ «ЭЛВИС», ЗАО «ПКК Миландр», ЗАО НТЦ «Модуль», ОАО

«НИИ КП», ОАО «РИРВ», ООО «ИРЗ ТЕСТ», ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», ФГУП ВО «Радиоэкспорт»)

9. Разработанные научно-методическое обеспечение и аппаратно-программные средства внедрены в ОАО «ЭНПО СПЭЛС», ОАО «НИИКП», ЗАО «МЦСТ».
10. Результаты диссертации внедрены в ОАО «ЭНПО СПЭЛС» при радиационных испытаниях отечественных и зарубежных ИС, комплектующих бортовую аппаратуру, на стойкость к факторам космического пространства в аппаратуре изделий 14Ф142, 14Ф148, Спектр-РГ, 14Ф137, KazSat-2, ЛТ150, Резонанс, 14В120, 14Р736, ФСЧ-Б, Эльбрус-2С+, АРТ ХС, БИВК КА 14Ф31, Луч-5В.

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

1. А.С. Тарараксин, Д.В. Савченков, А.А. Печенкин, Автоматизация радиационных испытаний на стойкость к воздействию отдельных заряженных частиц с использованием аппаратно-программного комплекса National Instruments и технологий .NET, Спецтехника и связь (входит в перечень ВАК), Москва 2011, С. 14-17.
2. А.С. Тарараксин, Р.Р. Нигматуллин, Д.В. Савченков, С.А. Соловьев, А.В. Яненко, Методики исследования и предотвращения развития катастрофического отказа вследствие одиночного тиристорного эффекта, V Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем МЭС-2012», Сборник трудов (входит в перечень ВАК), М.: ИППМ РАН, 2012, С. 628-633.
3. А.И. Чумаков, А.Л. Васильев, А.А. Печенкин, Д.В. Савченков, А.С. Тарараксин, А.В. Яненко, Оценка параметров чувствительности БИС к эффектам воздействия отдельных ядерных частиц с использованием лазерной и импульсной гамма-установок, V Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем МЭС-2012», Сборник трудов (входит в перечень ВАК), М.: ИППМ РАН, 2012, С. 594-597.
4. А.И. Чумаков, А.Л. Васильев, А.А. Печенкин, Д.В. Савченков, А.С. Тарараксин, А.В. Яненко, Совместное использование лазерной и импульсной гамма установок при оценке параметров чувствительности БИС к эффектам воздействия отдельных ядерных частиц, Микроэлектроника (входит в перечень ВАК, входит в базу данных Scopus), Том 41 №4, Москва 2012, С. 243-247.
5. Д.В. Савченков, А.А. Печенкин, А.И. Чумаков, Влияние конечного размера пятна облучения на достоверность оценки сечений одиночных эффектов лазерными имитационными методами, Известия вузов. Электроника (входит в перечень ВАК), №5 (97) Москва 2012, С. 71-77.
6. Егоров А.Н., Маврицкий О.Б., Чумаков А.И., Никифоров А.Ю., Телец В.А., Печенкин А.А., Яненко А.В., Кольцов Д.О., Савченков Д.В., Лазерные имитаторы «ПИКО» для испытаний электронной компонентной базы на стойкость к воздействию отдельных

- ядерных частиц, Спецтехника и связь (входит в перечень ВАК), №4-5, Москва 2011, С. 8-13.
7. Яненко А.В., Чумаков А.И., Печенкин А.А., Савченков Д.В., Тарараксин А.С., Васильев А.Л., Сравнительный анализ испытаний электронной компонентной базы на стойкость к воздействию отдельных ядерных частиц на лазерных имитаторах и ускорителях ионов, Спецтехника и связь (входит в перечень ВАК), №4-5, Москва 2011, С. 4-7.
  8. Alexander I. Chumakov, Alexander A. Pechenkin, Dmitry V. Savchenkov, Alexander S. Tararaksin, Alexey L. Vasil'ev and Andrey V. Yanenko, Local Laser Irradiation Technique for SEE Testing of ICs, The Conference on Radiation Effects on Components and Systems RADECS-2011.
  9. Alexander I. Chumakov, Dmitry V. Savchenkov, Alexander A. Pechenkin, Alexey L. Vasil'ev, Alexey O. Akhmetov, Andrey N. Egorov, Oleg B. Mavritskiy, Alexander S. Tararaksin and Andrey V. Yanenko, SEE Under Laser Radiation with Different Pulse Durations and Wavelengths, The Conference on Radiation Effects on Components and Systems RADECS-2012 (входит в базу данных Scopus).
  10. Alexander I. Chumakov, Alexander A. Pechenkin, Dmitry V. Savchenkov, Leonid N. Kessarinsky, Alexey L. Vasil'ev, Andrey V. Yanenko, Vasiliy S. Anashin, Pavel V. Chubunov, Compendium of SEE comparative results under ion and laser irradiation, The Conference on Radiation Effects on Components and Systems RADECS-2013.
  11. Dmitry V. Savchenkov, Alexander I. Chumakov, Andrey G. Petrov, Alexander A. Pechenkin, Andrey N. Egorov, Oleg B. Mavritskiy, Andrey V. Yanenko, Study of SEL and SEU in SRAM Using Different Laser Techniques, The Conference on Radiation Effects on Components and Systems RADECS-2013.
  12. Д.В. Савченков, А.А. Печенкин, А.И. Чумаков, Исследование тиристорных эффектов при воздействии лазерным излучением с различными характеристиками, Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость-2012», научно-технический сборник, С. 117-118..
  13. Савченков Д.В., Тарараксин А.С., Печенкин А.А., Автоматизация лазерных имитационных испытаний, Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость-2011», научно-технический сборник, С. 221-222.
  14. Д.В. Савченков, Корректировка значений сечения одиночных эффектов в ИС, полученных лазерными имитационными методами, Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость-2012», научно-технический сборник, С. 119-120.
  15. Савченков Д. В., Тарараксин А. С., Распределенная система управления лазерными имитационными испытаниями, 14-я Российская научно-техническая конференция «Электроника, микро- и нанoeлектроника», Суздаль 2012. Сборник научных трудов/под ред. В.Я. Стенина.- М.:МИФИ, 2012.
  16. Д.В. Савченков, А.Г. Петров, А.В. Яненко, А.И. Чумаков, П.А. Чубунов, В.С. Анашин, С.А. Яковлев, Сравнительные исследования тиристорных эффектов и сбоев в ОЗУ на ускорителе ионов и лазерном имитаторе, Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость-2013», научно-технический сборник, С. 167-168.