

ПЕЧЕНКИН АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ
ЛАЗЕРНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СТОЙКОСТИ КМОП БИС
К ТИРИСТОРНЫМ ЭФФЕКТАМ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ
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 – 2012 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, начальник отдела, ФГУ «12ЦНИИ Минобороны России» Потапенко Андрей Иванович
Ведущая организация:	ФГУ «22 ЦНИИИ Минобороны России»

Защита состоится 12 марта 2012 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 февраля 2012 г.

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

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор

П.К. Скоробогатов

Общая характеристика работы

Диссертация направлена на решение важной научно-технической задачи по развитию методов и средств оценки чувствительности КМОП БИС к тиристорным эффектам от воздействия отдельных ядерных частиц (ОЯЧ) космического пространства с использованием методик лазерного воздействия, имеющей существенное значение для оценки, прогнозирования и обеспечения радиационной стойкости электронных устройств вычислительной техники и систем управления космического назначения.

Актуальность темы диссертации

Проблема повышения сроков активного существования космических аппаратов при воздействии радиационных факторов космического пространства является крайне актуальной в связи с широким применением высокоинтегрированных изделий микроэлектроники в бортовой аппаратуре космических аппаратов. Вместе с тем, применение КМОП БИС с субмикронными проектными нормами приводит к возможности возникновения в них тиристорных эффектов в полях воздействия ОЯЧ (тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) и высокоэнергетичных протонов (ВЭП) космического пространства (КП)). Применение радиационно-стойких БИС или КМОП БИС, реализованных в базе технологии кремний на изоляторе (КНИ), позволяет решить задачу по обеспечению стойкости электронной аппаратуры к тиристорным эффектам. Но, к сожалению, крайне ограниченная функциональная номенклатура подобных изделий не позволяет обеспечить требуемые технические характеристики космических аппаратов. Поэтому разработчики электронной аппаратуры широко применяют высокоинтегрированные изделия микроэлектроники, изготовленные по субмикронной объемной КМОП технологии, которые потенциально уязвимы, так как имеют низкие пороги возникновения тиристорных эффектов при воздействии ОЯЧ. Поэтому крайне актуальной является задача по разработке методов оценки чувствительности КМОП БИС к тиристорным эффектам от воздействия ОЯЧ КП и реализации эффективных методов их парирования в электронной аппаратуре в случае их возникновения.

Существующие в России различные методы и средства оценки стойкости элементной базы к факторам космического пространства не способны в полной ме-

ре удовлетворить возрастающие потребности по испытаниям КМОП БИС отечественного и иностранного производства. Так, ускорители ионов, наиболее адекватно моделирующие воздействие заряженных частиц, не способны обеспечить испытания БИС, покрытых защитными компаундами, или БИС с «перевернутыми» кристаллами (технология Flip-chip). Это связано с недостаточной длиной пробега ионов, которая в реальной практике испытаний не превышает 100 мкм. Так же к существенным недостаткам испытаний на ускорителях ионов следует отнести высокую стоимость и сеансовый режим работы, который существенно увеличивает сроки проведения испытаний.

Ускорители протонов обладают большей по сравнению с ионами проникающей способностью, но при этом не позволяют моделировать воздействие частиц космического пространства с величиной линейных потерь энергии более 14 МэВ·см²/мг.

Разработка и широкое применение методик испытаний на чувствительность к тиристорным эффектам с помощью лазерного воздействия позволяет снять ряд ограничений, а также получать принципиально новые возможности при проведении испытаний.

Состояние исследований по проблеме

Вопросам моделирования эффектов от воздействия ОЯЧ с помощью сфокусированного лазерного воздействия были посвящены многочисленные работы зарубежных авторов: S.Buecher, P. Fouillat, V.Pouget, D.McMorrow, F. Miller и многих других специалистов. Принципиальная возможность применения локального лазерного облучения для имитации эффектов от воздействия ТЗЧ и ВП в КМОП БИС была показана в работах д.т.н. А.И. Чумакова, А.Н. Егорова, О.Б. Маврицкого, к.т.н. А.В. Яненко (НИЯУ МИФИ).

Имеющиеся в России на момент начала работы методические и технические средства не позволяли осуществлять практическое использование лазерного излучения для исследования тиристорных эффектов в КМОП БИС методами сфокусированного и локального лазерного воздействия, так как отсутствовали методики оценки потерь лазерного излучения на различных оптических неоднородностях на поверхности кристалла БИС.

Таким образом, к началу диссертационной работы возникла необходимость в

обобщении и систематизации данных, накопленных как в России, так и за рубежом, и разработке методик, средств и рекомендаций по применению лазерного излучения для оценки параметров чувствительности КМОП БИС в части тиристорных эффектов от воздействия ОЯЧ.

Целью диссертации является развитие методов и технических средств исследования и оценки параметров чувствительности КМОП БИС к тиристорным эффектам от воздействия ОЯЧ космического пространства с использованием сфокусированного и локального лазерного облучения, позволяющих провести количественную оценку параметров чувствительности КМОП БИС к тиристорным эффектам при воздействии отдельных ядерных частиц.

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

- анализ существующих методических и технических средств исследований тиристорных эффектов в КМОП БИС;

- моделирование ионизационной реакции в полупроводниковых структурах при воздействии сфокусированного и локального лазерного воздействия;

- разработка методики оценки коэффициента оптических потерь из анализа экспериментального отклика ионизационной реакции в цепи питания при локальном облучении части кристалла БИС;

- разработка расчетно-экспериментальных методов оценки параметров чувствительности КМОП БИС к воздействию ОЯЧ в части тиристорных эффектов по результатам сфокусированного и локального лазерных воздействий;

- создание новых и совершенствование существующих методических и технических средств испытаний КМОП БИС на стойкость к факторам космического пространства на основе лазерного воздействия;

- получение и систематизации экспериментальных данных.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Предложены и обоснованы оптимальные характеристики лазерного излучения для исследования тиристорных эффектов в КМОП БИС;

2. Разработана модель по оценке пороговой энергии лазерного излучения в современных КМОП БИС, основанная на представлении чувствительной области в виде прямоугольника, позволяющая учитывать конечные размеры чувствительной области и определять пороговую энергию остросфокусированного лазерного излучения даже в случае наличия многослойной металлизации над чувствительной

областью в КМОП БИС.

3. Предложена и обоснована методика экспериментальных исследований тиристорных эффектов в КМОП БИС с помощью локального лазерного воздействия, отличающая от существующих тем, что для поиска чувствительных областей используется локальное облучение с диаметром оптического пятна 20...50 мкм, и позволяющая учитывать влияние многослойной металлизации в современных КМОП БИС.

4. Предложена и обоснована расчетно-экспериментальная методика оценки количественных параметров чувствительности КМОП БИС к воздействию ОЯЧ в части тиристорных эффектов по результатам локального лазерного воздействия, отличающаяся от существующих тем, что для оценки коэффициента пропорциональности между энергией лазерного излучения и линейными потерями энергии используются параметры ионизационной реакции в цепи питания в той же области, где и был обнаружен тиристорный эффект.

5. Разработаны автоматизированные прецизионные средства перемещения и фиксации объектов исследований в составе уникального специализированного лабораторного лазерного комплекса, не имеющего аналогов в России, обеспечивающего возможность исследования тиристорных эффектов в широкой номенклатуре КМОП БИС, отличающегося от существующих зарубежных аналогов возможностью сканирования всей поверхности кристалла БИС локальным оптическим воздействием заданного диаметра с точностью позиционирования 0,1 мкм.

Практическая значимость работы:

1. Развита существующие методические и созданы новые технические средства, обеспечивающие возможность проведения испытаний на стойкость КМОП БИС к тиристорным эффектам на лазерных установках.

2. Получены оригинальные результаты экспериментальных исследований тиристорных эффектов для более 50 типов КМОП БИС, используемых в электронной аппаратуре космических аппаратов.

3. Результаты диссертации внедрены в ОАО «ЭНПО СПЭЛС» при радиационных испытаниях отечественных и зарубежных КМОП БИС, комплектующих

бортовую аппаратуру, на стойкость к факторам космического пространства в аппаратуре изделий 14Ф137, 14Ф142, 14Ф148, 14В120, ЛТ150, ЛУЧ-5А и других.

4. Разработаны при участии автора лазерные комплексы «Радон-9Ф» и «ПИКО-3» на основе сфокусированного и локального лазерных излучений наносекундной и пикосекундной длительностей, которые успешно используются при проведении испытаний КМОП БИС на стойкость к воздействию ОЯЧ по тиристорным эффектам. На экспериментальный комплекс «ПИКО-3» получен патент на полезную модель №110488, зарегистрированный в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 20 ноября 2011 г.

5. Результаты диссертации вошли в отчетные материалы по НИР и составным частям ОКР («Абонемент», «БИВК-СВВ», «Джут», «Микро-Д», «Перспектива - 2 СПЭЛС», «Сверло С2» и др.), выполняемых в интересах Минобороны РФ, Росатома и предприятий оборонного комплекса.

6. Результаты диссертации использованы в РД В 319.03.58-2010 «Методы испытаний и оценки стойкости интегральных схем и мощных МДП-транзисторов по эффектам отказов от воздействия отдельных высокоэнергетичных тяжелых заряженных частиц и протонов космического пространства» и в «Методические указания по обеспечению стойкости бортовой аппаратуры изделий разработки ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» к воздействию тяжелых заряженных частиц и высокоэнергетичных протонов космического пространства».

Результаты, выносимые на защиту:

1. Методы сфокусированного и локального лазерных воздействий для оценки чувствительности КМОП БИС к тиристорным эффектам при воздействии отдельных ядерных частиц, основанные на способности лазерного излучения ионизовать полупроводниковые структуры и позволяющие проводить количественную оценку параметров чувствительности КМОП БИС.

2. Требования к характеристикам лазерного излучения для исследования тиристорных эффектов в КМОП БИС, обеспечивающим получение количественных значений параметров чувствительности КМОП БИС при воздействии отдельных ядерных частиц.

3. Математическая модель по оценке параметров чувствительности КМОП БИС к тиристорному эффекту, основанная на представлении чувствительной об-

ласти в виде прямоугольника, позволяющая получить энергию лазерного излучения, приведенную к острогофокусированному значению.

4. Модель оценки доли лазерного излучения, достигающей активных приборных слоев БИС, основанная на анализе экспериментального отклика ионизационной реакции в цепи питания при локальном облучении части кристалла БИС, позволяющая количественно оценить оптические потери, вносимые многослойной металлизацией в современных КМОП БИС.

5. Методики экспериментальных исследований и расчетно-экспериментальной оценки параметров чувствительности КМОП БИС к воздействию отдельных ядерных частиц по тиристорным эффектам с помощью сфокусированного и локального лазерных воздействий, позволяющие в 2...3 раза повысить информативность, снизить стоимость и сроки проведения исследований.

6. Средства прецизионного перемещения и фиксации объектов исследований в составе уникального специализированного лабораторного лазерного комплекса, обеспечивающего возможность исследования тиристорных эффектов, не имеющего аналогов в России, отличающегося от существующих зарубежных аналогов возможностью сканирования всей поверхности кристалла БИС локальным оптическим воздействием заданного диаметра с точностью позиционирования 0,1 мкм.

7. Оригинальные результаты испытаний на стойкость КМОП БИС к тиристорному эффекту при воздействии ОЯЧ, которые использовались разработчиками при проектировании отказоустойчивой электронной аппаратуры космических аппаратов.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на Российских научных конференциях «Радиационная стойкость электронных систем» (Лыткарино, 2007...2011 гг.), «Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем», (ИППМ РАН, Истра, 2008, 2010 гг.), «Электроника, микро- и нанoeлектроника» (2007, 2009); «Электронная компонентная база космических систем» (Сочи 2010, 2011), «Сертификация ЭКБ-2011» (С. Петербург), научных сессиях МИФИ (Москва, 2006, 2008, 2009, 2012 гг.), на международном семинаре RADLAS (Франция, Париж, 2011) и на международной конференции RADECS-2011 (Испания, 2011).

Публикации: Основные результаты диссертации опубликованы в 31 работах (в период с 2006 по 2011 гг.), в том числе 8 – в реферируемых изданиях, рекомендованных ВАК и 1 - без соавторов.

Объем и структура диссертации. Диссертация содержит 126 страниц, в том числе 51 рисунок, 12 таблиц, список литературы из 182 наименований и состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Содержание диссертации

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

Первая глава посвящена анализу эффектов, возникающих в КМОП БИС при воздействии заряженных частиц. Показано, что наиболее опасным эффектом является эффект радиационно-индуцированного «зашелкивания» или тиристорный эффект.

Рассмотрены существующие средства и методы исследований тиристорных эффектов в лабораторных условиях, обозначены их преимущества и недостатки.

Показана необходимость совершенствования существующих и разработки новых методов для удовлетворения возрастающей потребности оценки стойкости КМОП БИС к факторам космического пространства в части тиристорных эффектов.

Вторая глава содержит описание метода на основе сфокусированного лазерного облучения для исследования тиристорных эффектов. На основе проведенного анализа обобщены и обоснованы требования к лазерному излучению для исследования тиристорных эффектов в КМОП БИС. Выявлены его возможности и преимущества по сравнению с классической процедурой проведения испытаний на ускорителях ионов. Показано, что данный метод успешно может использоваться при оценке чувствительности к ТЭ микросхем с не более, чем двумя слоями металлизации.

В третьей главе содержится описание предложенного метода расчетно-экспериментальной оценки параметров чувствительности КМОП БИС к тиристорному эффекту по результатам локального лазерного облучения. Предложены модели по оценке параметров чувствительности, в том числе по пороговой энергии и

размерам чувствительной области. Представлены методики для оценки сечения возникновения тиристорного эффекта от энергии лазерного излучения или от эквивалентных значений линейных потерь энергии (ЛПЭ). Экспериментально показано минимально необходимое количество лазерных воздействий для достоверной оценки сечения насыщения. Проведено сравнение параметров чувствительности, полученных при локальном лазерном воздействии и при воздействии пучков ионов.

Четвертая глава посвящена техническим и аппаратно-программным средствам обеспечения исследований тиристорного эффекта методами локального лазерного облучения. Обоснована трудоемкость лазерных имитационных испытаний, и предложены пути их автоматизации. Представлены различные технические и аппаратно-программные средства, разработанные при участии автора.

Заключение обобщает основные теоретические и практические результаты диссертации.

Эффекты от воздействия заряженных частиц в КМОП БИС

При пролете ОЯЧ через полупроводниковую структуру основным механизмом потери энергии является ионизация. При ионизации активных структур в КМОП БИС могут возникать следующие эффекты:

- 1) Сбой в ячейке памяти или регистровой структуре, проявляющийся в инверсии хранимой информации (SEU в зарубежной литературе).
- 2) Включение паразитных тиристорных структур, проявляющееся потерей работоспособности БИС, существенном повышении тока потребления и возможном необратимом тепловом повреждении (SEL в зарубежной литературе).
- 3) Возникновение переходных процессов («иглолок») на выходах аналоговых и комбинационных схем (SET в зарубежной литературе).
- 4) Пробой подзатворного окисла в мощных МДП транзисторах (SEGR в зарубежной литературе)
- 5) Вторичный пробой в МДП транзисторах, связанный с открытием паразитного биполярного транзистора при пролете заряженной частицы (SEB в зарубежной литературе).

Все перечисленные эффекты являются локальными радиационными эффектами, и они возникают из-за генерации относительно большого локального заряда в

чувствительной области полупроводникового элемента. Так при пролете частицы с величиной линейных потерь энергии $1\text{МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$ в чувствительном объеме генерируется заряд равный 10.4 фКл на каждый мкм пробега частицы.

Чувствительность КМОП БИС к любому из локальных радиационных эффектов может быть характеризована минимальным набором параметров: пороговой величиной линейных потерь энергии и сечением насыщения данного эффекта. Для адекватной оценки вероятностей локальных ионизационных эффектов в космическом пространстве методы и средства исследований должны обеспечивать изменение эквивалентных линейных потерь энергии в диапазоне от 1 до $100\text{МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$.

Для большинства КМОП БИС, комплектующих бортовую аппаратуру и работающих при относительно небольших напряжениях питания (менее 15-20В), наиболее вероятными эффектами являются одиночные сбои, эффекты переходных процессов и тиристорный эффект. Наиболее опасным является тиристорный эффект, так как вследствие его развития электронная аппаратура может отказаться.

Тиристорный эффект – это пороговый эффект, связанный с активизацией паразитных многослойных структур при дестабилизирующих воздействиях. Паразитная структура обычно образуется на границе карман-подложка КМОП БИС, и в ней участвуют подложка, карман и стоки р- и n- канальных транзисторов. Тиристорный эффект может приводить к потере функционирования БИС в целом, а без принятия специальных мер по парированию тиристорного эффекта и к отказу БИС или источника питания этой БИС.

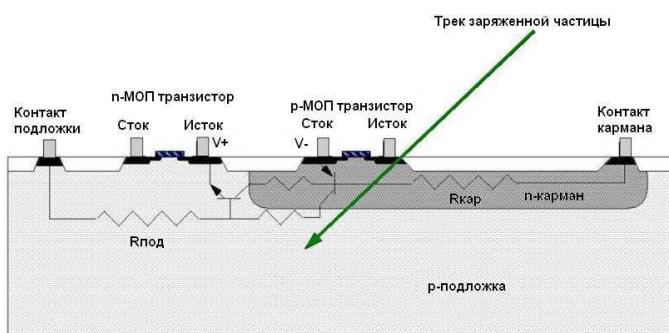


Рисунок 1. Паразитная структура на границе карман-подложка КМОП БИС

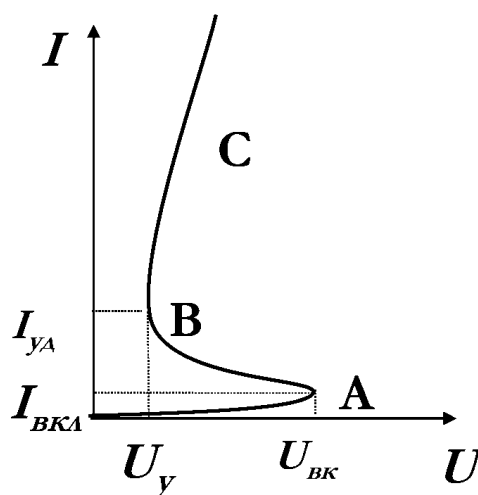


Рисунок 2. ВАХ тиристорного эффекта

Так как при проектировании БИС учесть наличие таких паразитных структур практически невозможно, шины металлизации, питающие данные структуры, могут оказаться не рассчитанными на протекание больших токов. Таким образом, при включении паразитной структуры от пролета заряженной частицы может происходить перегорание шин питания и выход БИС из строя.

Как правило, испытания БИС для оценки их параметров чувствительности к локальным радиационным эффектам от воздействия ОЯЧ проводят на ускорителях ионов и протонов. При этом этим испытаниям присущи следующие недостатки:

- влияние дозовых эффектов в процессе исследования;
- низкая информативность из-за случайного характера попадания ионов или протонов в кристалл БИС;
- наведенная активность облучаемых образцов;
- дистанционный характер измерения при наличии больших электромагнитных помех, что делает техническим сложным проведение контроля функционально сложных или прецизионных БИС;
- сложности реализации методов исследования электрических характеристик ТЭ и «живучести» БИС после ее выдержки определенное время в состоянии ТЭ;
- высокая стоимость и сеансовый режим работы ускорителей ионов в России и ряд других.

Необходимо также добавить, что при облучении БИС на пучках ионов из-за относительно небольших их пробегов в кремнии (30...50 мкм) принципиально невозможно провести испытания БИС с «перевернутыми» кристаллами, при наличии защитных покрытий на поверхности кристалла и т.п. К тому же не решена научно-техническая задача по оценке значений ЛПЭ непосредственно в активной области элемента БИС.

Экспериментальные установки на базе лазерных имитаторов основаны на способности лазерного излучения пикосекундной длительности с энергией кванта больше ширины запрещенной зоны генерировать в локальном объеме полупроводника неравновесные заряды. Несмотря на то, что при воздействии лазерного излучения и при пролете отдельной заряженной частицы профили распределения неравновесных носителей заряда существенно различаются, за счет процессов амби-

полярной диффузии к началу формирования электрической реакции в полупроводниковых структурах (через времена порядка 100 пс) различия в структуре ионизации практически исчезают.

Величина сгенерированного заряда при лазерном воздействии без учета двухфотонного поглощения линейно зависит от энергии лазерного излучения. Таким образом, эквивалентные линейные потери энергии заряженных частиц так же пропорциональны энергии лазерного излучения.

Однако, в связи с тем, что лазерное излучение не способно проникать сквозь слои металлизации БИС и существенно ослабляться в поликремниевых слоях, возникает проблема оценки доли энергии лазерного излучения, дошедшего до активных полупроводниковых структур. Так, например, при попадании в мощную шину питания сфокусированное лазерное излучение полностью отразится, и в активных структурах не произойдет ионизации. Лазерным методам на основе сфокусированного излучения пикосекундной длительности присущи следующие недостатки:

- экранирующее действие металлизации;
- невозможность ионизации металлов и диэлектриков;
- косвенный пересчет к эквивалентным значениям ЛПЭ;
- конечный размер пятна лазерного излучения.

При однородной засветке всей площади кристалла БИС из-за возникновения ионизационных токов большой амплитуды внутри кристалла возникают просадки питания, которые существенным образом меняют условия возникновения тиристорного эффекта. Из-за высокой чувствительности тиристорного эффекта к приложенному к паразитной структуре напряжению, при однородном лазерном воздействии возможна ситуация, в которой тиристорный эффект не разовьется при любых уровнях однородного воздействия. Это связано с тем, что амплитуда ионизационных токов достигает такой величины, что просадка питания на внутреннем сопротивлении шин питания уменьшает приложенное к паразитной структуре напряжение ниже величины, необходимой для включения тиристорного эффекта.

Так как амплитуда ионизационных токов пропорциональна энергии лазерного излучения уменьшение доли площади кристалла, подвергающегося лазерной засветке, уменьшит величину протекающих токов, и, как следствие, уменьшит просадку питания.

Методы и средства исследований тиристорных эффектов на основе сфокусированного лазерного излучения

Возможность применения сфокусированного лазерного излучения пикосекундной длительности широко описана в работах зарубежных авторов S. Buecher, P. Fouillat, V. Pouget, D. McMorrow, F. Miller и многих других специалистов. Однако в этих работах не приводится каких-либо методических рекомендаций по практическому выявлению тиристорных структур, а лишь предлагается «сплошное» упорядоченное сканирование сфокусированным излучением отдельных блоков БИС. Так же отмечается низкая производительность подобных исследований. Обозначена проблема экранирующего влияния многослойной металлизации в современных КМОП БИС. Следует особо подчеркнуть, что различными авторами в ходе экспериментальных исследований применяются лазерные источники с длиной волны от 0.53 мкм до 1.08 мкм без всякого научно-технического объяснения возможности их применения.

На основе проведенного анализа автором предложены и обоснованы оптимальные характеристики лазерного излучения для исследования ТЭ. Показано, что длительность импульса необходимо выбирать из условия, что она должна быть существенно меньше времени развития локального радиационного эффекта. Для современных БИС этим требованиям удовлетворяют лазеры с длительностью импульса менее 100 пс и энергией лазерного излучения, изменяемой в диапазоне от долей наноджоулей до нескольких микроджоулей. В технически обоснованных случаях, когда время развития тиристорного эффекта превышает 50 нс, возможно применение наносекундных лазеров с длительностью не более 10 нс.

Длина волны лазерного излучения зависит от технологии изготовления интегральных схем. При использовании «перевернутых» кристаллов длина волны должна находиться в пределах от 1.0 мкм до 1.08 мкм. В случае облучения кристаллов со стороны расположения активных областей длина волны может меняться от 0.8 до 1.08 мкм. При этом целесообразно использовать более коротковолновое излучение для БИС с количеством слоев металлизации более трех. Для КНИ/КНС БИС оптимальным является лазерное излучение с длиной волны 0.52...0.54 мкм.

Автором предложена оригинальная методика псевдослучайного сфокусированного лазерного воздействия на поверхность кристалла БИС по траекториям типа «змейка» или «спираль», позволяющая выявлять области чувствительности к ТЭ

и количественно оценивать параметры чувствительности. При облучении со стороны приборного слоя кристалла методика имеет ограничение по применимости для исследований в БИС с технологическими проектными нормами менее 0.5 мкм и наличием более 2-х слоев металлизации.

В результате проведенных автором экспериментальных исследований показано, что в БИС с проектными нормами более 0.5 мкм размеры областей чувствительности обычно составляют более 100 мкм², то есть для выявления всех областей чувствительности на кристалле достаточно проводить сфокусированное лазерное воздействие с площадью сетки воздействия менее 100 мкм². Так, например, для покрытия кристалла площадью 0.25 см² потребуется порядка 3·10⁴ воздействий. Современными лазерными имитаторами с частотой повторения импульсов от десятков до сотен герц такое количество воздействий может быть выполнено за несколько часов.

Предложенная автором методика применения сфокусированного лазерного излучения основана на «разреженном» сканировании всей поверхности кристалла БИС и подсчете общего количества имеющих место локальных радиационных эффектов - $N_{лэ}$. По результатам экспериментальных исследований могут быть определены эквивалентные значения линейных потерь энергии L_z и сечения наблюдаемых эффектов $\sigma_{лэ}$ из соотношений:

$$L_z \approx K_\lambda \cdot J_{ли} \quad (1)$$

$$\sigma_{лэ} = A_{ис} \cdot N_{лэ} / N_l; \quad (2)$$

где $J_{ли}$ - значение энергии сфокусированного лазерного излучения, $A_{ис}$ - площадь кристалла БИС; N_l - общее количество импульсов лазерного излучения при сканировании всей поверхности кристалла БИС.

Значение коэффициента пропорциональности K_λ между энергией лазерного излучения и эквивалентными линейными потерями энергии определяется соотношением:

$$K_\lambda = 1,8 \cdot 10^4 \cdot \alpha_o \cdot \lambda \cdot (1 - R_\lambda) / \rho, \quad (3)$$

где α_o - коэффициент межзонного поглощения лазерного излучения в 1/см; λ - длина волны лазерного излучения в мкм; R_λ - коэффициент отражения от поверхности БИС; ρ - плотность полупроводника в мг/см³.

Так, при воздействии лазерного излучения с длиной волны 1.06 мкм в кремневой полупроводниковой структуре выражение для линейных потерь энергии принимает вид:

$$L_z \approx 56 J_{ли}, \quad [\text{МэВ} \cdot \text{см}^2 / \text{мг}], \quad (4)$$

где энергия лазерного излучения имеет размерность [нДж].

Данная методика сфокусированного лазерного воздействия может получить существенное развитие для БИС с многослойной металлизацией при облучении с тыльной стороны подложки, т.к. экранирующие действие металлизации при этом исчезает.

Следует отметить, что, несмотря на псевдослучайность воздействия сфокусированным лазерным излучением, аналогичную случайному воздействию при испытаниях на ускорителях ионов, существует координатная привязка каждого лазерного импульса к местоположению на кристалле БИС. Тем самым возможна локализация отдельных блоков чувствительности к тиристорному эффекту с помощью лазерных имитаторов, что неосуществимо при проведении исследований на ускорителях протонов и ионов. Так же возможно целенаправленное воздействие на отдельные блоки и узлы БИС, в отличие от исследований на ускорителях ионов и протонов.

Методы и средства исследований тиристорных эффектов на основе локального лазерного излучения

Ограниченные возможности метода на основе сфокусированного лазерного излучения для современных субмикронных БИС с тремя и более слоями металла привели к необходимости разработки нового метода на основе локального лазерного облучения, успешно развитого автором. Под локальным подразумевается такой размер лазерного пятна, который вызывает ТЭ, но не приводит к просадке питания (в диапазоне от единиц до сотен мкм). Так при воздействии локального лазерного излучения сетка металлизации представляет собой некий фильтр, вносящий потери. Проходя через многослойную металлизацию современной БИС, лазерное излучение за счет дифракции и повторных переотражений достигает активных полупроводниковых структур. При этом за счет более широкого диаметра оптического пятна по сравнению со сфокусированным воздействием удается проинтегрировать

оптические неоднородности и пользоваться неким усредненным коэффициентом оптических потерь.

На основании сделанных автором предположений о представлении чувствительной области в виде прямоугольника была разработана модель по оценке параметров чувствительности КМОП БИС к ТЭ. Для возникновения локального эффекта в КМОП структуре необходимо, чтобы в чувствительном объеме выделялась энергия, превышающая пороговую энергию данного эффекта E_{th} . Так как типовая форма профиля лазерного излучения описывается законом Гауссова распределения, то в чувствительной области выделяется доля энергии, пропорциональная интегралу от функции распределения Гаусса в пределах границ чувствительной области. Экспериментально, варьируя диаметр лазерного излучения, можно получить зависимость порога энергии возникновения тиристорного эффекта от диаметра лазерного пятна (рисунок 3). Из математической модели, аппроксимирующей данную зависимость, можно определить параметры чувствительной области: геометрические размеры и минимальную энергию возникновения одиночного эффекта.

Для оценки эквивалентных значений ЛПЭ необходимо оценить долю лазерного излучения, теряемую на оптических неоднородностях и металлизации. Автором показана потенциальная возможность проведения подобной оценки из анализа амплитуды ионизационной реакции в цепи питания. При локальном облучении за счет переотражений, дифракции и т.п. часть оптического излучения все-таки достигает активных полупроводниковых структур, формируя ионизационную реакцию. Однако реальная полупроводниковая структура БИС представляет собой множество р-п переходов, и локальное воздействие приводит к формированию сложного распределения токов и потенциалов внутри структуры, которое не очень сильно коррелирует с реальной физической картиной, имеющей место при наличии ионизации от трека ОЯЧ. Тем не менее, если рассматривать суммарную ионизационную реакцию в цепи питания, то можно предположить что она будет формироваться в БИС в виде интегрированной реакции, как будто облучается один «большой» р-п переход.

Это предположение было проверено в ходе численного моделирования ионизационной реакции при облучении множество р-п переходов, расположенных на разных расстояниях друг от друга. Проводилась оценка изменения ионизационной реакции в полупроводниковой структуре размерами

$100 \times 100 \times 300 \text{ мкм}^3$ в случае наличия одного большого перехода и нескольких р-п переходов, равномерно расположенных по поверхности кристалла. Проводилось моделирование воздействия импульса ионизирующего излучения при различных расстояниях между р-п переходами.

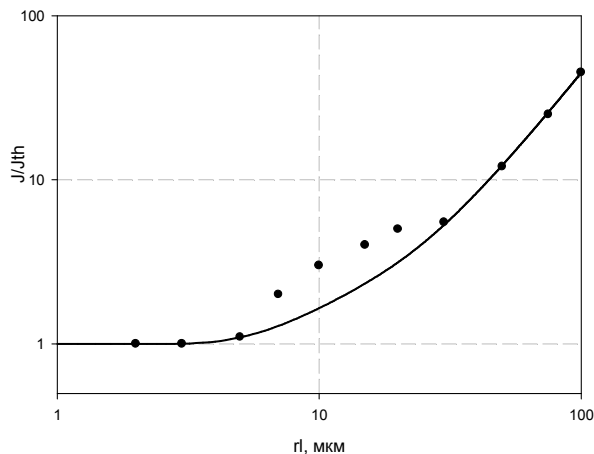


Рисунок 3. Сравнение экспериментальной и расчетной зависимостей пороговой энергии возникновения ТЭ от диаметра оптического пятна

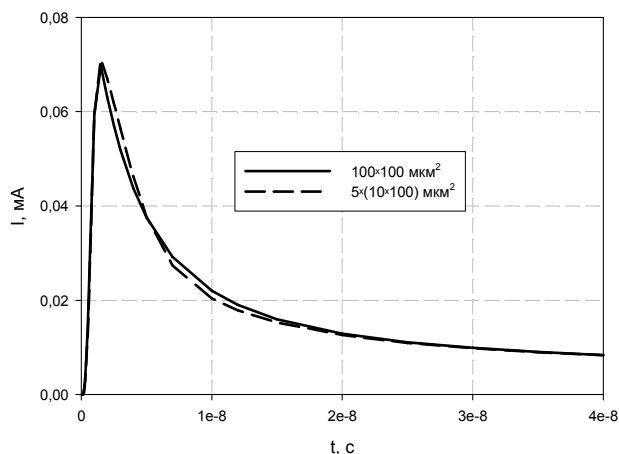


Рисунок 4. Ионизационный ток в отдельном р-п переходе и в структуре с пятью р-п переходами

В результате проведенного анализа было выявлено, что вплоть до расстояний между переходами порядка 10 мкм заметных различий в реакции структуры не наблюдается. На рисунке 4 в качестве примера представлены результаты моделирования ионизационного тока при воздействии импульса ионизирующего излучения длительностью 70 пс для отдельного р-п перехода площадью $100 \times 100 \text{ мкм}^2$ и пяти р-п переходов длиной 100 мкм и шириной 10 мкм с расстояниями между ними также равными 10 мкм. Нетрудно заметить, что обе эти реакции практически совпадают между собой.

Моделирование проводилось с помощью системы физико-топологического моделирования «DIODE-2» в двухмерном приближении. Важный результат, который был получен в ходе расчетного моделирования, связан с независимостью характеристик интегрированной ионизационной реакции БИС от значения локальной площади зоны облучения при условии, что не будут иметь место нелинейные эффекты, обусловленные как поглощением оптического излучения в материалах, так и нелинейными ионизационными эффектами.

В линейном приближении ток в цепи питания определяется процессами собирания заряда с подложки, и его амплитудно-временные характеристики при

локальном воздействии лазерного импульса практически не зависят от диаметра пятна:

$$\Delta I(t) \approx q \cdot g_o \cdot (1 - R_\lambda) \frac{J_u}{T_p} \cdot \frac{\alpha_o}{K'_m} \cdot \frac{\varepsilon_i}{h\nu} \cdot \frac{10^{-2}}{10^{-7} \rho} L(t), \quad (5)$$

где ΔI – ионизационный ток в цепи питания; g_o – скорость генерации носителей заряда в кремнии; T_p – длительность импульса лазерного излучения; J_u – энергия лазерного излучения; α_o – коэффициент межзонного поглощения лазерного излучения; R_λ – коэффициент отражения от поверхности БИС; ρ – плотность полупроводника; ε_i – энергия образования одной электронно-дырочной пары (3.6 эВ в кремнии); $h\nu$ – энергия кванта лазерного излучения K'_m – коэффициент потерь лазерного излучения на оптических неоднородностях при измерении ионизационной реакции в цепи питания; $L(t)$ – значение эффективной длины собирания носителей заряда из подложки в момент времени t .

За счет интегрирования на внутренних и внешних инерционностях БИС форма ионизационной реакции на токосъемном резисторе может быть оценена из соотношения:

$$\Delta U(t) \approx \frac{R_t}{R_{in} + R_t} \cdot \frac{\exp(-t/RC)}{C} \cdot \int_0^t \exp(x/RC) \cdot \Delta I(x) dx \quad (6)$$

где R_t – величина токосъемного резистора, R_{in} – величина эквивалентного внутреннего сопротивления БИС; $C = C_{in} + C_l$ – величина суммарной емкости БИС и измерительной оснастки (внешних цепей), C_{in} – величина эквивалентной внутренней емкости БИС; C_l – эквивалентная емкость внешних измерительных цепей; $RC = (R_{in} + R_t) C$ – эквивалентная постоянная времени. Важно подчеркнуть, что в современных БИС величина C_{in} может составлять несколько нФ, поэтому ее влиянием нельзя пренебрегать.

Оценка ионизационной реакции может быть представлена в следующем виде:

$$\Delta U(t) \approx 10^5 q \cdot g_o \cdot (1 - R_\lambda) \cdot \frac{R_t}{R_{in} + R_t} \cdot \frac{J_u}{C} \cdot \frac{\alpha_o}{K'_m} \cdot \frac{\varepsilon_i}{h\nu} \cdot \frac{1}{\rho} L_e(t), \quad (7)$$

где $L_e(t)$ – эффективная длина собирания носителей заряда, которая определяется с учетом интегрирования ионизационного тока на внутренних и внешних инерционностях.

Результаты моделирования показывают, что амплитудно-временные характеристики преимущественно определяются параметрами эквивалентной RC-цепи, и при одинаковых значениях постоянной времени формы импульсов не отличаются друг от друга.

Таким образом, из анализа ионизационной реакции можно провести оценку ряда необходимых параметров. Например, проведя измерения ионизационной реакции БИС при локальном лазерном облучении и разных значениях внешних элементов R_t и C_t , можно определить значения внутренних эквивалентных емкости и сопротивления, анализируя величины длительности импульса, и тем самым провести расчетную оценку $\Delta U(t)$.

Полученные результаты, в свою очередь, позволяют определить максимальное значение эффективной длины собирания заряда с подложки L_{e_max} . На основе полученных параметров из сравнения расчетных и экспериментальных значений амплитуд ионизационной реакции в цепи питания можно оценить значение коэффициента оптических потерь K'_m .

Эквивалентная величина ЛПЭ без учета эффектов двухфотонного поглощения при воздействии лазерного излучения может быть определена соотношением:

$$L_z \approx \alpha_o \cdot (1 - R_\lambda) \cdot \frac{J_{лу}}{K_m} \cdot \frac{\varepsilon_i}{hv} \frac{1}{\rho} = \frac{K_\lambda}{K_m} \cdot J_{лу}, \quad (8)$$

где $J_{лу}$ – энергия сфокусированного лазерного излучения K_m – коэффициент потерь лазерного излучения на оптических неоднородностях; K_λ – коэффициент пропорциональности между ЛПЭ и энергией лазерного излучения.

Выражая коэффициент потерь лазерного излучения через амплитуду ионизационной реакции, соотношение для оценки эквивалентной величины ЛПЭ преобразуется к виду:

$$L_z = \frac{J_{лу}}{J_u} \cdot \frac{\Delta U_{max}}{L_{e_max}} \left(1 + \frac{R_{in}}{R_t}\right) \cdot \frac{C}{10^5 \cdot q \cdot g_o} \frac{K'_m}{K_m} \approx 9.1 \cdot 10^9 \frac{J_{лу}}{J_u} \cdot \frac{C \cdot \Delta U_{max}}{L_{e_max}} \left(1 + \frac{R_{in}}{R_t}\right) \cdot \frac{K'_m}{K_m} \quad (9)$$

где размерность L_z принята [МэВ·см²/мг].

Интересно отметить две характерные особенности представленного соотношения:

1) При проведении оценки эквивалентных значений ЛПЭ по методике локального облучения в одной и той же области облучения значения K_m и K'_m будут равны между собой.

2) В соотношении (9) используются лишь отношения энергий лазерного излучения, поэтому погрешности в определении коэффициентов поглощения и отражения не влияют на результаты оценок величин ЛПЭ. Необходимо только, чтобы величина $1/\alpha_0$ превышала максимальное значение эффективной длины собирания носителей заряда.

Максимальное значение эффективной длины собирания заряда может быть определено через постоянную времени импульса ионизационной реакции с использованием расчетных номограмм, представленных на рисунке 5. Нетрудно заметить, что значительную погрешность в величине L_{e_max} (и, как следствие, L_z) дают различия в типе подложки. В случае отсутствия сведений о типе используемой подложки рекомендуется применять среднее значение, при котором погрешность оценок будет составлять величину около 30%. Однако для большинства современных субмикронных БИС используется подложка р-типа.

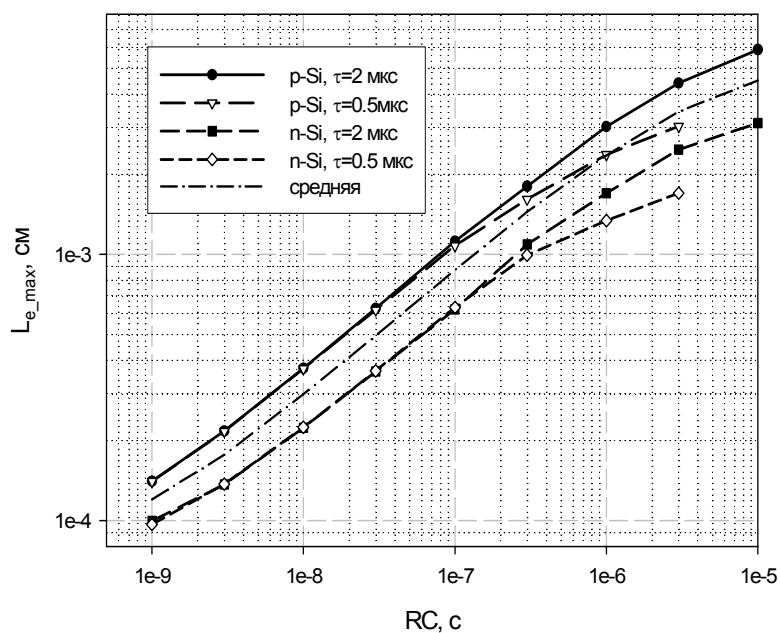


Рисунок 5. Изменения максимальной длины собирания в подложках n- и р-типов от величины эквивалентной постоянной времени RC (для длительности импульса 70пс.)

Аппаратно-программные и технические средства

Проведение исследований ТЭ методом лазерного воздействия требует определенного набора технических средств. На основе проведенного анализа автором были разработаны следующие требования к лазерному имитатору для исследования ТЭ в КМОП БИС:

- Система фокусировки лазерного излучения должна обеспечивать фокусировку лазерного излучения до минимально возможного размера в несколько мкм, а так же обеспечивать возможность локального облучения с увеличенным диаметром (до 1000 мкм);
- Лазерный источник должен обеспечивать возможность генерации одиночных импульсов и периодически повторяющихся импульсов, а так же поддерживать управление от персонального компьютера;
- Система позиционирования объекта испытаний должна обеспечивать перемещение исследуемой БИС в составе устройства задания электрических параметров и контроля функционирования в трех координатных направлениях с точностью не хуже десятых долей мкм;
- Система ослабления энергии лазерного излучения должна обеспечивать возможность изменения уровня энергии, падающей на поверхность кристалла БИС, в диапазоне не менее 10^4 раз, при максимальном уровне энергии не менее 1 мкДж.

Перечисленным выше требованиям с учетом полученных ранее ограничений на характеристики лазерного излучения удовлетворяют созданные при участии автора лазерные стенды «Пико-3» и «Радон-9ф».

Автором показано и обосновано включение в состав технических средств следующих дополнительных устройств:

- управляемый источник питания, обеспечивающий измерение тока потребления и быстрое отключение питания в случае развития тиристорного эффекта;
- специализированные оснастки задания электрических режимов и контроля функционирования БИС, разнообразие которых определяется номенклатурой исследуемых БИС;

- высокоскоростной запоминающий осциллограф, регистрирующий ток в цепи питания БИС при развитии тиристорного эффекта, а так же при регистрации ионизационной реакции в цепи питания БИС.

На разработанном при участии авторе комплекса были проведены исследования и испытания широкой номенклатуры КМОП БИС отечественного (1635PY1Y, 1635PY2, 1645PY1, 1645PY2, 1839BA1, 1890BM1, 1890BM2, 1892BM1T, 1891BM1, 1892BM8T, 1892КП1Я и др.) и иностранного (ADUC841BS62, AM29LV040B, AT27BV040, FM33256-G, K9K8G08U0A-PIBO, XC1765E, XC95144, TMS320C50PQA57, TMS320VC5416GGU160, XCV300E-6BG352I и др.) производства, всего более 50 типов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные и практические результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

Основной результат диссертации заключается в развитии методов и технических средств исследования и оценки параметров чувствительности КМОП БИС к тиристорным эффектам от воздействия ОЯЧ космического пространства с использованием сфокусированного и локального лазерного облучения, позволяющих получать количественные оценки параметров чувствительности.

Основные теоретические результаты диссертации:

1. Определены требования к характеристикам лазерного излучения для исследования тиристорных эффектов в КМОП БИС, которые легли в основу разработки экспериментальных лазерных установок «Радон-9Ф» и «ПИКО-3».

2. Разработана модель оценки пороговой энергии лазерного излучения, основанная на представлении чувствительной области в виде прямоугольника, позволившая учесть конечные размеры чувствительной области и определить пороговую энергию остросфокусированного лазерного излучения при наличии многослойной металлизации над чувствительной областью в КМОП БИС.

3. Разработана модель оценки коэффициента оптических потерь, основанная на анализе экспериментального отклика ионизационной реакции в цепи питания при локальном облучении части кристалла БИС, позволившая количественно учесть оптические потери, вносимые многослойной металлизацией в современных КМОП БИС.

4. Предложены и апробированы методики экспериментальных исследований и расчетно-экспериментальной оценки параметров чувствительности КМОП БИС к воздействию отдельных ядерных частиц по тиристорным эффектам с помощью сфокусированного и локального лазерных воздействий, которые позволили проводить оценку чувствительности КМОП БИС к ТЭ, локализовывать места возникновения ТЭ, определять сохранение работоспособности КМОП БИС после нахождения в состоянии ТЭ в течение определенного промежутка времени, определять электрические и динамические параметры развития ТЭ в КМОП БИС.

5. Разработана расчетно-экспериментальная методика оценки количественных параметров чувствительности КМОП БИС к воздействию ОЯЧ в части тиристорных эффектов по результатам локального лазерного воздействия, отличающаяся от существующих тем, что для оценки коэффициента пропорциональности между энергией лазерного излучения и линейными потерями энергии используются параметры ионизационной реакции в цепи питания в той же области, где и обнаружен ТЭ.

Основные практические результаты диссертации и их внедрение:

1. Разработаны и внедрены в ОАО «ЭНПО СПЭЛС» методики экспериментальных испытаний тиристорных эффектов в КМОП БИС с помощью лазерного воздействия. Методики нашли применение при проведении радиационных испытаниях отечественных и зарубежных КМОП БИС, комплектующих бортовую аппаратуру, на стойкость к факторам космического пространства в изделиях: 14Ф137, 14Ф142, 14Ф148, 14В120, ЛТ150, ЛУЧ-5А и других.

2. При участии автора разработаны и внедрены в ОАО «ЭНПО СПЭЛС» специализированные лабораторные лазерные комплексы «Радон-9Ф» и «ПИКО-3» на основе сфокусированного и локального лазерных излучений наносекундной и пикосекундной длительностей. На экспериментальный комплекс «ПИКО-3» получен патент на полезную модель №110488, зарегистрированный в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 20 ноября 2011 г.

3. Получены и систематизированы оригинальные экспериментальные данные, устанавливающие общность радиационного поведения для более 50 типов КМОП БИС на стойкость к тиристорным эффектам при воздействии ОЯЧ, необходимые разработчикам космических аппаратов для оценки частоты возникновения

тиристорных эффектов в реальных условиях эксплуатации.

4. Результаты диссертации вошли в нормативные и методические документы: в РД В 319.03.58-2010 «Методы испытаний и оценки стойкости интегральных схем и мощных МДП-транзисторов по эффектам отказов от воздействия отдельных высокоэнергетичных тяжелых заряженных частиц и протонов космического пространства» и «Методические указания по обеспечению стойкости бортовой аппаратуры изделий разработки ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» к воздействию тяжелых заряженных частиц и высокоэнергетичных протонов космического пространства».

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

- 1) Чумаков А.И., Печенкин А.А., Егоров А.Н., Маврицкий О.Б., Баранов С.В., Васильев А.Л., Яненко А.В. Методика оценки параметров чувствительности ИС к тиристорному эффекту при воздействии отдельных ядерных частиц // Микроэлектроника. 2008. том 37. №1. М.: «Наука». 2008. С.45-51.
- 2) Чумаков А.И., Васильев А.Л., Козлов А.А., Кольцов Д.О., Криницкий А.В., Печенкин А.А., Тарараксин А.С., Яненко А.В. Прогнозирование локальных радиационных эффектов в ИС при воздействии факторов космического пространства // Микроэлектроника, 2010. том 39. №2. М.: «Наука». 2010. С.85-90.
- 3) Чумаков А.И., Печенкин А.А., Егоров А.Н., Маврицкий О.Б., Баранов С.В., Васильев А.Л. Оценка параметров чувствительности СБИС к радиационным эффектам с помощью методики локального лазерного облучения // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем–2008 / Под общ. редакцией. А.Л. Стемповского. М.: ИППМ РАН. 2008. С. 256-259.
- 4) 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. 2011. №4-5. С.4-7.
- 5) Егоров А.Н., Маврицкий О.Б., Печенкин А.А., Чумаков А.И. Оценка чувствительности КМОП ИС к тиристорному эффекту на лазерном имитаторе // Электроника, микро- и наноэлектроника. Сб. научн. трудов / Под редакцией В.Я.Стенина. М.: МИФИ. 2007. С.239-245.

- 6) Печенкин А.А., Чумаков А.И., Егоров А.Н., Маврицкий О.Б. Определение параметров тиристорного эффекта с помощью локального лазерного воздействия // Научно-технический сборник. Радиационная стойкость электронных систем. Стойкость-2008. Вып. 11. М.: МИФИ. 2007. С.189-190.
- 7) Кольцов Д.О., Печенкин А.А., Чумаков А.И., Маврицкий О.Б., Егоров А.Н. Аппаратно-программный комплекс для исследования стойкости ИС к воздействию ОЯЧ с помощью локального лазерного облучения // Научная сессия МИФИ-2008. Сб. научн. трудов. В 16 т. М.: МИФИ. 2008. Т.1. с.43-45.
- 8) Чумаков А.И., Егоров А.Н., Маврицкий О.Б., Печенкин А.А., Яненко А.В. Сканирующий лазерный комплекс ПИКО-3 для моделирования ионизационных эффектов в ИС // Научно-технический сборник. Радиационная стойкость электронных систем. Стойкость-2009. Вып. 12. М.: МИФИ. 2009. С.181-182.
- 9) Печенкин А.А. Влияние статистических факторов на достоверность оценки сечения насыщения по тиристорному эффекту // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2010 Аннотации докладов. В 3 т. Т. 1. М.: НИЯУ МИФИ. 2010, С.148.
- 10) Егоров А.Н., Маврицкий О.Б., Чумаков А.И., Никифоров А.Ю., Печенкин А.А., Яненко А.В. Патент на полезную модель №110488 «Лазерный имитатор для исследования радиационной стойкости интегральных схем к воздействию отдельных заряженных частиц» // Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 20 ноября 2011г.