

На правах рукописи

Экз. №

ГЕРАСИМЧУК ОЛЕГ АНАТОЛЬЕВИЧ

**МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА
ИСПЫТАНИЙ КМОП МИКРОСХЕМ
НА СТРУКТУРАХ «КРЕМНИЙ-НА-САПФИРЕ»
НА ИМПУЛЬСНУЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ**

05.13.05 - Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:

Москва - 2009

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Скоробогатов Петр Константинович

НИЯУ МИФИ

Официальные
оппоненты:

доктор технических наук
Данилин Николай Семенович
РНИИКП

кандидат технических наук
Вавилов Владимир Алексеевич
ОАО «НИИМЭ и Микрон»

Ведущая организация:

ФГУ «22 ЦНИИИ Минобороны России»

Защита состоится 15 февраля 2010 г. в 16 час. на заседании диссертационного совета Д 212.130.02 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 Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»

Автореферат разослан 12 декабря 2009 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 посвящена решению важной научно-технической задачи – разработке методов и средств испытаний КМОП микросхем на структурах «кремний-на-сапфире» (КМОП/КНС) на импульсную электрическую прочность, что позволит обеспечить комплектование устройств вычислительной техники и систем управления объектов военного и специального назначения современной элементной базой с высокими эксплуатационными характеристиками и повышенной стойкостью к воздействию электромагнитных источников естественного и искусственного происхождения.

Актуальность темы диссертации. Доля ИС и БИС, выполненных по КМОП (комплементарные металл-окисел-полупроводник) технологии, составляет по количеству и номенклатуре от 60 до 80% общего объема микросхем, комплектующих аппаратуру современных объектов вооружения и военной техники (ВВТ). Стойкость этих изделий к радиационным и электромагнитным воздействиям в значительной мере определяет технические характеристики и ресурсные возможности аппаратуры. Наиболее перспективными КМОП-изделиями для комплектования объектов ВВТ являются КМОП ИС, выполненные по технологии «кремний-на-сапфире» (КНС), вследствие своей потенциально высокой радиационной стойкости и способности работать в широком температурном диапазоне.

Однако помимо радиационных факторов на функционирование и работоспособность современных устройств вычислительной техники и систем управления оказывают влияние электромагнитные излучения (ЭМИ) естественного и искусственного происхождения. Для аппаратуры объектов ВВТ необходим также учет влияния ЭМИ ядерного взрыва (ЯВ).

В соответствии с нормативными документами стойкость ИС к воздействию наводок от ЭМИ характеризуют импульсной электрической прочностью (ИЭП), под которой понимают зависимости предельно-допустимых значений напряжения (тока, мощности, энергии) от длительности одиночных электрических импульсов (ОИИ), возникающих от действия электромагнитного импульса.

Увеличение числа возможных источников ЭМИ, расширение их спектра в сторону высоких частот, повышение степени интеграции

современной элементной базы требуют проведения исследований с целью разработки методического аппарата и технических средств для определения уровней стойкости ИС к воздействию ЭМИ современных и перспективных источников.

При всех своих достоинствах по радиационной стойкости КМОП/КНС ИС имеют ряд особенностей, связанных с тонкопленочной структурой рабочих слоев. К ним относятся, прежде всего, низкая устойчивость к электростатическим разрядам, малые пробивные напряжения, что может накладывать ограничения на их использование в аппаратуре ВВТ.

Возможности расчетной оценки стойкости КМОП/КНС ИС к воздействию ОИН существенно ограничиваются сложным характером КНС структур, разбросом технологических параметров, зависимостью электрических и тепловых параметров элементов структур от их геометрических размеров и взаимного расположения.

Поэтому возникла актуальная научная задача, которая заключается в разработке методического обеспечения и технических средств испытаний КМОП/КНС ИС военного и специального назначения на импульсную электрическую прочность.

Важность и актуальность темы диссертации отражена в «Основах политики Российской Федерации в области развития электронной компонентной базы на период до 2010 года и дальнейшую перспективу», утвержденных Президентом Российской Федерации 12.04.2002, в соответствии с которыми создание радиационно-стойкой электронной компонентной базы отнесено к одной из приоритетных задач в области ее дальнейшего развития при разработке, производстве и применении в стратегически значимых системах.

Решению этих вопросов, а именно: анализу механизмов повреждения КМОП/КНС ИС под действием ОИН и разработке на этой основе методического обеспечения и технических средств испытаний КМОП/КНС микросхем военного и специального назначения на импульсную электрическую прочность - посвящены исследования, проводившиеся с 2003 по 2009 год, итогом которых и является данная диссертация.

Состояние исследований по проблеме. Исследованиям воздействия импульсных ОИН на ИС посвящено значительное число работ как российских, так и зарубежных авторов, результаты которых

отражены в большом количестве монографий, статей, докладов на конференциях, стандартов, руководящих документов и методик.

Вопросам создания и развития КМОП/КНС ИС посвящены работы Полякова И.В., Герасимова Ю.М., Григорьева Н.Г., Киргизовой А.В. и других специалистов. В результате были разработаны и успешно применены в аппаратуре отечественные КМОП КНС БИС ЗУ серии 1620 с рекордным уровнем сбоеустойчивости, подтвержденном в ходе испытаний. Трудami Герасимова В.Ф., Посысаева Е.И., Яковлева Е.Н., Хрулева А.К. исследованы основы физики повреждений ИС при воздействии ОИН, разработаны методические и технические основы проведения испытаний ИС на ИЭП. В работах Ванина В.И. и Макеева С.Н. предложены и развиты аппаратные и программные средства для определения ИЭП полупроводниковых приборов (ПП) и ИС.

Проблема воздействия ЭМИ на РЭА усугубляется созданием и появлением в последние годы источников помех с широким спектром излучений – ЭМИ перспективных источников (ЭМИ ПИ).

Однако обзор существующих моделей, методик и технических средств испытаний показал, что они не могут в полной мере быть использованы для определения показателей ИЭП современных КМОП/КНС ИС по следующим основным причинам:

- узкий диапазон используемых ОИН, ограниченный требованиями современных нормативных документов, и не учитывающий возможность воздействия перспективных источников ЭМИ с расширенным спектром излучения;

- отсутствие учета особенностей проявления тепловых механизмов повреждения КМОП/КНС, связанных с тонкопленочным характером КНС структур;

- отсутствие возможности учета формы и длительности ОИН на показатели ИЭП КМОП/КНС ИС;

- отсутствие обоснования требований к параметрам технических средств испытаний КМОП/КНС ИС на стойкость к воздействию ОИН и самих аттестованных средств.

Отмеченные выше недостатки существующих моделей, методик и технических средств, сдерживают применение КМОП/КНС ИС в аппаратуре специального назначения и не позволяют им в полной мере реализовать на практике свои преимущества.

Целью диссертации является разработка методов и средств испытаний КМОП/КНС ИС военного и специального назначения на

импульсную электрическую прочность, что позволит решить важную научно-техническую задачу расширения сферы применения КМОП/КНС ИС в аппаратуре объектов ВВТ.

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

- теоретическим анализом, моделированием и экспериментальным исследованием влияния ЭМИ естественного и искусственного происхождения на КМОП/КНС ИС;

- развитием имитационных методов моделирования воздействия ЭМИ на КМОП/КНС ИС использованием генератора ОИН;

- разработкой моделей повреждения элементов КМОП/КНС ИС под действием наведенных ОИН с учетом особенностей процессов теплопереноса в тонкопленочных структурах, нелинейных эффектов переноса носителей в полупроводнике и с учетом возможности воздействия наводок с различной формой импульса;

- разработкой методов испытаний КМОП/КНС ИС на стойкость к воздействию ОИН с учетом возможности проявления скрытых и аддитивных механизмов повреждения;

- разработкой и изготовлением технических средств испытаний КМОП/КНС ИС, включая сложно-функциональные, на стойкость к воздействию ОИН;

- проведением экспериментальной апробации разработанных моделей, методов и технических средств.

Научная новизна работы:

1. На основании электромагнитного анализа взаимодействия ЭМИ с КМОП/КНС ИС, показано, что с расширением спектрального состава ЭМИ растет доля поглощенной в кристалле ИС энергии. Однако, даже с учетом спектра ЭМИ перспективных источников излучения, поглощенной в кристалле ИС энергии недостаточно для заметного энерговыделения в КМОП/КНС ИС и непосредственным влиянием поля ЭМИ на кристалл ИС также можно пренебречь.

2. На основании электромагнитного и физико-топологического анализа типовой КМОП/КНС структуры показано, что основным источником возможных повреждений при воздействии ЭМИ являются электрические сигналы, наведенные на выводы ИС и соединительные проводники. Это позволяет использовать имитационные методы моделирования воздействия ЭМИ на КМОП/КНС ИС путем подачи на

внешние выводы ОИН от генератора-имитатора.

3. На основании двумерного численного моделирования электротепловых процессов к КНС структурах определена зависимость ИЭП от длительности ОИН. Показано, что зависимость ИЭП от длительности ОИН слабее, чем предсказывает формула $V_m \sim t_i^k$ с коэффициентом $k = -0,5$ (модель Вунша-Белла). Показано также, что импульсная электрическая прочность p-n переходов КНС структур при воздействии ОИН двухэкспоненциальной формы примерно на 20-30% больше, чем при воздействии ОИН прямоугольной формы.

Практическая значимость работы:

1. Разработана методика проведения испытаний КМОП/КНС ИС на ИЭП, позволившая стандартизировать процедуру испытаний и распространить ее на современные КМОП/КНС ИС и БИС высокой функциональной сложности.

2. Сформулированы и изложены основные требования к генератору-имитатору ОИН для моделирования воздействия ЭМИ на КМОП/КНС ИС.

3. Разработан и изготовлен генератор ОИН для определения ИЭП КМОП/КНС ИС, удовлетворяющий поставленной задаче. Проведена аттестация разработанного генератора, подтвердившая необходимые электрические параметры ОИН.

3. Разработаны типовая структура экспериментальной установки для проведения испытаний КМОП/КНС ИС на ИЭП. Разработана методика проведения испытаний ИС на стойкость к ОИН, учитывающая особенности КМОП/КНС ИС. Предложены и апробированы методические и программные средства, повышающие достоверность проведения испытаний ИС на ИЭП

4. В результате испытаний более чем 120 типов КМОП ИС (включая 17 типов КМОП/КНС ИС) было обнаружено, в частности, что коэффициент корреляции между напряжением ИЭП (V_m) и максимально-допустимой энергией повреждения (J_m) ниже, чем для КМОП ИС объемной технологии. Это свидетельствует о меньшей обработанности КМОП/КНС технологии на настоящее время.

5. Результаты экспериментов над КМОП/КНС ИС подтвердили адекватность разработанной численной модели разогрева тонких структур под действием ОИН. Они подтвердили, в частности, что

зависимость показателя ИЭП от длительности ОИН для КМОП/КНС ИС существенно слабее, чем для КМОП ИС объемной или эпитаксиальной технологий.

6. Результаты диссертации использованы на практике при разработке и обеспечении импульсной электрической прочности КМДП/КНС ИС серий 5511 и 1825 предприятия НИИИС, серии 1825 ОАО «Ангстрем», использованы в ОАО «ЭНПО СПЭЛС» при разработке нового поколения генераторов ОИН.

Результаты, выносимые на защиту:

1. Модели повреждения элементов КМОП/КНС ИС под действием ОИН с учетом особенностей процессов теплопереноса в тонкопленочных структурах и с учетом особенностей воздействия ЭМИ современных и перспективных источников излучения и ОИН различной длительности и формы.

2. Методика проведения испытаний КМОП/КНС ИС на ИЭП, позволившая стандартизировать процедуру испытаний и распространить ее на современные КМОП/КНС ИС и БИС высокой функциональной сложности.

3. Разработанные аппаратные и программные средства для проведения испытаний КМОП/КНС ИС на ИЭП.

4. Результаты экспериментов по определению ИЭП КМОП/КНС ИС подтвердившие адекватность разработанных моделей разогрева тонких структур под действием ОИН.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации докладывались на российских научных конференциях «Радиационная стойкость электронных систем» (Лыткарино, МО, 2003, 2005 – 2009 гг.); научных сессиях МИФИ (Москва, 2004, 2005 и 2008 гг.); научных конференциях «Электроника, микро– и нанoeлектроника» (г. Кострома, 2003 г., г.Н.Новгород 2004 г., г. Гатчина, 2006 г.); на научно-практических семинарах «Проблемы создания специализированных радиационно-стойких СБИС на основе гетероструктур» (г. Н.Новгород, 2003 и 2004 гг.).

Основные результаты диссертации опубликованы в 18 работах (в период с 2003 по 2009 гг.). Две работы опубликованы без соавторов. Две работы опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. По

результатам работы получено положительное решение о выдаче патента на полезную модель генератора импульсных сигналов.

Основные результаты диссертации также вошли в отчетные материалы по 5 госбюджетным и хоздоговорным НИР. Список основных работ приведен в конце диссертации.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, и заключения. Содержит 176 страниц печатного текста, включая 80 рисунков, 7 таблиц и список литературы из 97 наименований.

Содержание диссертации

В первой главе дан обзор современного уровня развития КМОП/КНС ИС с точки зрения возможности их использования в объектах ВВТ. Показано, что технология «кремний-на-сапфире» является весьма перспективной для разработки современных ИС устройств вычислительной техники и систем управления объектов ВВТ. При этом диэлектрическая изоляция активных элементов потенциально позволяет обеспечить существенное повышение показателей радиационной стойкости, особенно к воздействию импульсного ионизирующего излучения, по сравнению с объемной КМОП технологией.

Однако помимо несомненных достоинств КМОП/КНС изделий существуют проблемы использования КНС технологии и приборов на ее основе. Основными из них являются такие как саморазогрев, низкая стойкость к электростатическим разрядам, малые пробивные напряжения, что ограничивают сферу применения КНС приборов и требуют учета при их разработке и применении. Широкому использованию КМОП/КНС ИС препятствует их повышенная уязвимость к воздействию ОИН, вызванных воздействием ЭМИ естественного и искусственного происхождения. Поэтому актуальной является задача по разработке методов и средств контроля импульсной электрической прочности КМОП/КНС ИС.

Анализ типичных ситуаций показал, что формы импульсов ОИН, воздействующих на ИС, различны в зависимости от конфигурации линии и вида нагрузки и могут иметь аperiодический одно- и двухполупериодный или колебательный затухающий характер. Форма импульса, как правило, хорошо аппроксимируется суммой двух экспонент. Поэтому импульсную электрическую прочность ПП и ИС определяют по максимально допустимой амплитуде ОИН

двухэкспоненциальной формы. Длительность фронта принимают равной 5 – 10 нс, а длительность импульса на полувысоте от 0,1 до 10 мкс.

Сложность определения уровней стойкости КМОП/КНС ИС к ОИН обусловлена следующими причинами:

- многообразием физических эффектов, происходящих в ИС при воздействии ОИН, и связанной с этим необходимостью использования многопараметрических критериев стойкости;

- сильной зависимостью уровня стойкости от выбранных для испытаний выводов элемента;

- нелинейным характером большинства происходящих процессов и связанным с этим зависимостью стойкости по данной группе выводов КМОП/КНС ИС от условий подключения на других выводах;

- зависимостью уровня стойкости от формы ОИН и эквивалентного импеданса окружающей схемы, включая организацию цепи питания;

- сложностью внутренней структуры современных КМОП/КНС ИС, тонкопленочным характером приборных слоев КНС структур.

Поэтому необходимо проведение исследований особенностей электрического повреждения КНС приборов с целью определения потенциальных механизмов отказов изделий и их уровней, а именно:

- анализ влияния ЭМИ, включая перспективные источники излучений, на КМОП/КНС ИС;

- разработка моделей повреждения элементов КМОП/КНС ИС под действием ОИН с учетом особенностей процессов теплопереноса в тонкопленочных структурах, нелинейных эффектов переноса носителей в полупроводнике и с учетом возможности воздействия наводок с различной формой импульса;

- разработка методов испытаний КМОП/КНС ИС на стойкость к воздействию ОИН с учетом возможности проявления скрытых и аддитивных механизмов повреждения;

- разработка и изготовление технических средств испытаний КМОП/КНС ИС на стойкость к воздействию ОИН;

- проведение экспериментальной апробации разработанных моделей, методов и технических средств.

Вторая глава содержит анализ пределов применимости имитационных методов моделирования воздействия ЭМИ на КМОП/КНС ИС.

Практически полное отсутствие влияния электрической и магнитной компонент ЭМИ ЯВ на параметры ПП и ИС было доказано теоретически и экспериментально в ряде работ. Однако, с расширением спектрального состава ЭМИ современных и перспективных источников и появления ИС новых технологических исполнений (КМОП/КНС) возникла необходимость оценки непосредственного энерговыделения за счет поглощения энергии поля ЭМИ в кристалле ИС.

Типичная геометрия облучения КМОП/КНС ИС полем ЭМИ приведена на рис. 1. Кристалл сапфира толщиной 250 – 500 мкм с тонким кремниевым слоем (доли мкм) размещен на проводящем основании.

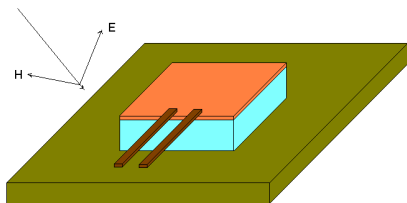


Рисунок 1 - Кристалл КМОП/КНС ИС в поле плоской электромагнитной волны

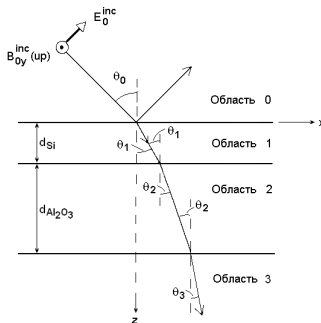


Рисунок 2 - Падение плоской электромагнитной волны на границу раздела воздух-полупроводник

Энергия электромагнитного поля приводит к энерговыделению в полупроводниковом слое вследствие двух основных механизмов:

- непосредственное поглощение части энергии поля в полупроводящем слое ИС;
- наводка сигналов на подводящие выводы ИС и последующая передача энергии в кристалл.

С целью определения границ применимости имитационных методов моделирования воздействия ЭМИ на ИС, необходимо было определить соотношение между этими механизмами энерговыделения для типовой геометрии воздействия, показанной на рис. 2.

Область 0 представляет собой воздух, область 1 – слой кремния, 2 –

сапфировая подложка, 3 – металлическое основание. Здесь d_{Si} – толщина приборного слоя кремния, $d_{Al_2O_3}$ – толщина сапфировой подложки. Рассматривалась плоская электромагнитная волна, падающая из воздуха на границу раздела между областями 0 и 1.

В результате линейного электромагнитного анализа было показано, что доля поглощенной в кристалле КНС ИС растет с ростом частоты спектра ЭМИ и уровня легирования приборного слоя. На рис. 3 приведены графики спектральной плотности двух рассматриваемых видов ЭМИ вместе с расчетным графиком максимального коэффициента поглощения энергии ЭМИ кристаллом КНС от частоты.

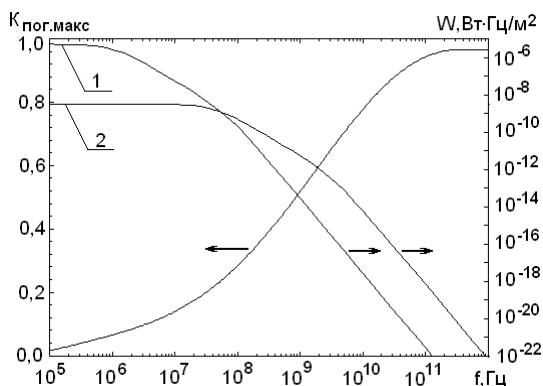


Рисунок 3 - Графики спектральной плотности двух видов ЭМИ (W) (1 - ЭМИ ЯВ, 2 – ЭМИ ПИ) вместе с графиком максимального коэффициента поглощения энергии ЭМИ ($K_{\text{пог}}$) кристаллом КНС от частоты

В качестве примеров были выбраны следующие импульсы ЭМИ:

1. Типичный импульс ЭМИ ЯВ ($E_{\text{max}}=300$ кВ/м, $H_{\text{max}}=790$ А/м, $t_{\text{и}}=100$ нс, $t_{\text{ф}}=5$ нс). Поток энергии, переносимый импульсом ЭМИ ЯВ (вектор Умова-Пойтинга) составляет около $8 \cdot 10^{-4}$ Дж/см².

2. Импульс ЭМИ перспективных источников (ЭМИ ПИ) ($E_{\text{max}}=300$ кВ/м, $H_{\text{max}}=790$ А/м, $t_{\text{и}}=2,5$ нс, $t_{\text{ф}}=0,1$ нс). Поток энергии, переносимый импульсом ЭМИ ПИ составляет около $2 \cdot 10^{-5}$ Дж/см².

Видно, что с ростом частоты сигнала падает спектральная плотность энергии, переносимая ЭМИ, но растет доля поглощенной в кристалле КНС ИС энергии. Расчеты показывают, что из переносимых ЭМИ ЯВ через 1 см² энергии ($8 \cdot 10^{-4}$ Дж) может максимально

поглотиться $5 \cdot 10^{-5}$ Дж. То есть около 6% всей энергии. Даже если считать, что вся эта энергия полностью выделилась в приборном слое кремния, плотность энерговыделения составит около 1 Дж/см^3 , а дополнительный нагрев слоя не превысит 2°C .

Результаты расчетов показали, что из переносимых ЭМИ ПИ через 1 см^2 энергии ($2 \cdot 10^{-5}$ Дж) может максимально поглотиться $4 \cdot 10^{-6}$ Дж. То есть около 20% всей энергии. Однако, сама величина этой энергии недостаточна для существенного нагрева приборного слоя.

Для оценки энерговыделения в приборном слое КМОП/КНС ИС вследствие наводки от ЭМИ была рассмотрена геометрия облучения, при которой наводка обусловлена наличием всего лишь выводов ИС длиной 2 см. С целью анализа энерговыделения был использован программный комплекс физико-топологического моделирования "DIODE-2D", позволяющий анализировать двумерный нестационарные процессы переноса носителей в полупроводниковых структурах, в том числе, и при воздействии внешних ОИН.

В качестве модели входной цепи была выбрана КМОП/КНС ИС с типичной цепью защиты на входе, изображенная на рис. 4. На рис. 5 приведено пространственное распределение энерговыделения по поперечнику анализируемой входной цепи КМОП/КНС ИС при воздействии ЭМИ ЯВ (в момент времени максимума энерговыделения).

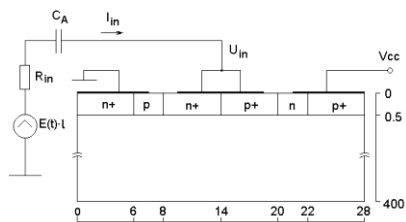


Рисунок 4 – Физико-топологическая модель схемы защиты на входе КМОП/КНС ИС

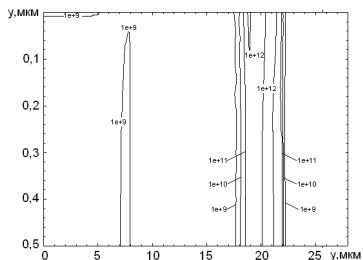


Рисунок 5 - Пространственное распределение энерговыделения в Вт/см^3 по сечению схемы защиты

Видно, что максимальное энерговыделение локализовано в узкой приповерхностной области под p+-областью в n-кармане, а интенсивность энерговыделения доходит до величины $6 \cdot 10^{12} \text{ Вт/см}^3$. Полная величина удельного энерговыделения составляет по расчетам

$4,8 \cdot 10^3$ Дж/см³, что более чем на 3 порядка превосходит величину энерговыделения от непосредственного поглощения энергии ЭМИ в приборном слое кремния (1 Дж/см³)!

При воздействии ЭМИ ПИ интенсивность энерговыделения доходит до величины $5,8 \cdot 10^{15}$ Вт/см³ в точке максимального энерговыделения, что более чем на два порядка превышает соответствующую величину от ЭМИ ЯВ. Полная величина удельного энерговыделения составляет по расчетам $3,8 \cdot 10^5$ Дж/см³, что более чем на 6 порядков превосходит величину энерговыделения от непосредственного поглощения энергии ЭМИ в приборном слое кремния (0,08 Дж/см³)! Столь высокие значения энерговыделения связаны с тем, что почти вся энергия выделяется в очень маленьком объеме у поверхности кристалла.

В случае воздействия наводки от ЭМИ, поступающая по выводам прибора, поглощенная энергия локализуется в относительно небольших по размеру областях энерговыделения, что приводит к появлению опасных для работы прибора областей локального перегрева. Внешние выводы улавливают энергию ЭМИ, а внутренняя металлизация и неоднородная структура ИС локализуют энерговыделение в малых критичных объемах. Именно этот механизм приводит к появлению первичных и вторичных механизмов необратимого повреждения ИС под действием ЭМИ.

Следовательно, во всем диапазоне времен, частот и интенсивностей, присущих современным и перспективным источникам ЭМИ, действие ЭМИ может быть смоделировано воздействием на выводы КМОП/КНС ИС электрических сигналов от специализированных генераторов-имитаторов.

Третья глава содержит результаты разработки моделей повреждения КМОП/КНС ИС под действием ОИН с учетом особенностей процессов теплопереноса в тонкопленочных структурах.

На основании анализа технологии изготовления современных КМОП/КНС ИС показано, что их стойкость к воздействию ОИН определяется схмотехникой и топологией цепей защиты входных, выходных цепей, а также цепей разводки питания. Поэтому ИЭП КМОП/КНС ИС определяется, в конечном счете, электротепловым поведением р-п переходов цепей защиты.

Анализ электротеплового поведения цепей защиты потребовал совместного решения фундаментальной системы уравнений для

переноса носителей заряда вместе с уравнениями тепловыделения и теплопереноса. Для получения адекватных решений были учтены температурные зависимости электрофизических параметров кремния, а также теплоемкости и теплопроводности полупроводниковых и диэлектрических слоев.

На основе одномерного электротеплового анализа показано, что с уменьшением толщины приборного слоя кремния КМОП/КНС ИС увеличивается ее сопротивление и плотность тока перегрузки в ней. В результате характеристики защиты от ОИН могут ухудшаться с уменьшением толщины пленки кремния в КНС структурах. В результате моделирования показано, что только при пропорциональном уменьшении всех размеров КНС-структуры максимальная температура с ростом степени интеграции увеличивается незначительно. Это связано с увеличением отношения охлаждающей площади к объему структуры при сокращении всех линейных размеров.

С целью определения характера влияния параметров ОИН на ИЭП было выполнено численное двумерное моделирование теплового пробоя типичных КМОП и КМОП/КНС структур. Применение двумерного моделирования позволило учесть реальную геометрию моделируемых структур и граничные условия на контактах и поверхности полупроводника.

В качестве примера на рис. 6 приведены диаграммы распределения температуры и эффективной концентрации в р-n переходе КМОП и КМОП/КНС-технологии при воздействии ОИН двухэкспоненциальной формы длительностью 0,1 мкс в момент максимума температуры.

Из анализа видно, что точка перегрева, в которой происходит тепловой пробой, находится в р-области вблизи контакта. В этой точке достигаются максимальная эффективная концентрация и температура. Градиенты температуры и концентрации носителей в поперечном направлении для КМОП/КНС структуры практически равны нулю, что связано с малой толщиной приборного слоя.

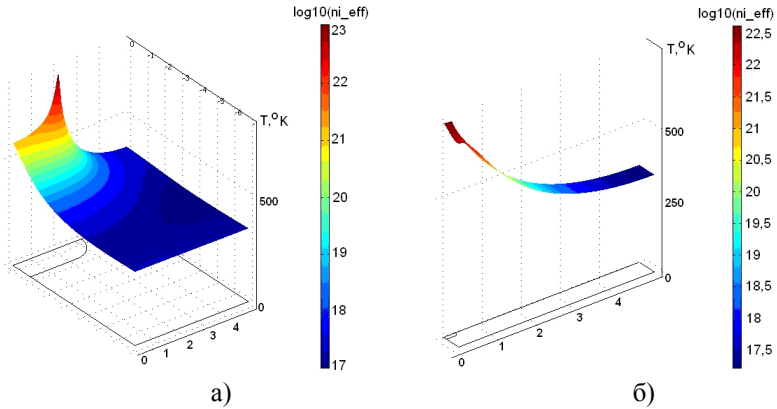


Рисунок 6 - Диаграммы распределения температуры и эффективной концентрации носителей в р-п переходе КМОП (а) и КМОП/КНС КНС-технологии (б) при воздействии ОИН двухэкспоненциальной формы длительностью 0,1 мкс:

Результаты численного моделирования были использованы для анализа влияния длительности ОИН на ИЭП элементов ИС различных технологий. Максимальные значения амплитуды ОИН двухэкспоненциальной формы определены для длительностей импульса в диапазоне от 0,1 мкс до 10 мкс для трех образцов различной технологии и представлены на рис. 7.

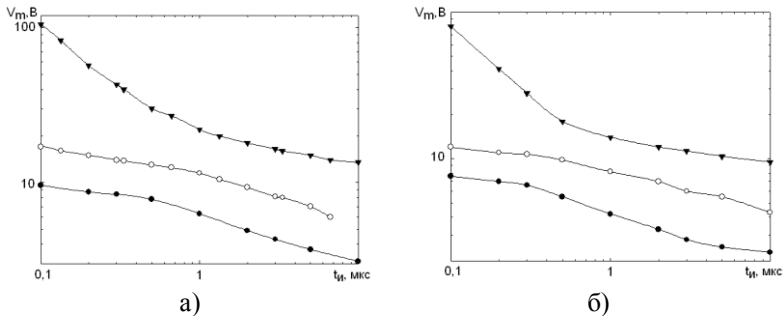


Рисунок 7 - Зависимости максимальной амплитуды (V_m) ОИН двухэкспоненциальной (а) и прямоугольной (б) форм от длительности ОИН для р-п переходов различных технологий:

▲ - объемная технология; ○ - эпитаксиальная; ● - КНС

Как и предполагалось, наибольшую стойкость имеют образцы с максимальным размером границы р-п перехода, то есть объемной технологии. Значения максимальной амплитуды экспоненциально убывают при увеличении длительности ОИН. Обращает на себя внимание тот факт, что с уменьшением размеров элементов, уменьшается разница между показателями стойкости к воздействию ОИН различной длительности.

Линейная регрессия расчетных данных показывает, что:

- для р-п переходов, сформированных объемной технологией снижение показателей стойкости при увеличении длительности ОИН двухэкспоненциальной формы от 0,1 до 10 мкс составляет 8,9 раза;
- для р-п переходов эпитаксиальной технологии – 4,6 раза;
- для р-п переходов КНС-технологии – 3,55 раза.

Такое явление связано с увеличением роли теплообмена с окружающей средой при уменьшении размеров элементов. Это означает, что для КНС-структур предположение о промежуточном характере нагрева (модель Вунша-Белла) не работает и зависимостью ИЭП от длительности ОИН слабее зависимости $V_m \sim t_i^k$ с коэффициентом $k = -0,5$. Значение этого коэффициента для КМОП/КНС структур лежит в диапазоне $-0,28 \dots -0,32$.

Воздействие ОИН прямоугольной формы принципиально не отличается от воздействия ОИН двухэкспоненциальной формы. С уменьшением размеров элементов, также уменьшается разница между показателями стойкости к воздействию ОИН различной длительности. Линейная регрессия расчетных данных показывает, что:

- для р-п переходов, сформированных объемной технологией снижение показателей стойкости при увеличении длительности ОИН от 0,1 до 10 мкс составляет 7,4 раза;
- для р-п переходов эпитаксиальной технологии – 2,7 раза;
- для р-п переходов КНС-технологии – 3,7 раза.

В целом, результаты расчетов показали, что импульсная электрическая прочность р-п перехода при воздействии ОИН прямоугольной формы примерно на 20-30% ниже, чем при воздействии ОИН двухэкспоненциальной формы.

Таким образом, результаты численного моделирования подтвердили предположение о том, что при прочих равных условиях (амплитуда и длительность) наиболее опасным по последствиям является прямоугольный ОИН. Двухэкспоненциальный импульс,

используемый при испытаниях на ИЭП, является менее опасным. Для расчета ИЭП при прямоугольном импульсе надо умножить показатель ИЭП для двухэкспоненциального импульса, который заносится в ТУ на изделие, на $1,4 \pm 0,1$.

С целью исследования влияния фронта на ИЭП проведено моделирование воздействия ОИН длительностью 0,1 мкс на образцы р-п переходов различного размера для ряда значений фронта в диапазоне от 0,1 до 5 нс. Результаты расчетов показывают, что с уменьшением длительности фронта стойкость ИС к ОИН падает. Однако изменения эти небольшие и составляют чуть более 3% в диапазоне длительностей фронтов от 0,1 до 5 нс.

В четвертой главе проанализированы особенности проведения испытаний КМОП/КНС ИС на ИЭП. Показано, что в ходе испытаний необходимо учитывать особенности поведения КМОП/КНС ИС при воздействии ОИН, к которым относятся:

- малые постоянные времени собственного нагрева элементов КНС ИС, составляющие порядка нескольких десятков наносекунд и менее;
- возможность появления участков негативного сопротивления КНС элементов до порога тепловой неустойчивости;
- широкий диапазон уровней ИЭП в зависимости от конструктивно-технологического исполнения КМОП/КНС ИС.

Эти особенности необходимо учитывать при выборе технических средств, разработке программ-методик и проведении самих испытаний. К основным мерам относятся следующие:

- выбор диапазона изменения амплитуды испытательного ОИН;
- выбор шага изменения амплитуды ОИН;
- выбор временного интервала между подачами очередных ОИН;
- необходимость контроля не только функционирования, но и деградации параметров КМОП/КНС ИС после каждого воздействия с целью выявления скрытых и аддитивных механизмов повреждения изделия (параметрический контроль);
- выбор приборного парка для контроля функционирования и деградации параметров КМОП/КНС ИС с учетом малых времен установления тепловых процессов в элементах ИС.

На основе проведенного анализа были сформулированы требования к генератору ОИН с перечисленными ниже параметрами.

1. Генератор ОИН предназначен для формирования на выводах КМОП/КНС ИС импульсов тока и напряжения, имитирующих

соответствующие импульсы тока и напряжения, наводимые при воздействии ЭМИ.

2. Форма импульса сигнала напряжения, вырабатываемая генератором подчиняется двухэкспоненциальному приближению $V(t) = V_m[\exp(-t/\tau_1) - \exp(-t/\tau_2)]$ с параметрами:

- $\tau_2 = 2 \cdot 10^{-9}$ с; $\tau_1 = 1,5 \cdot 10^{-7}$ с, $1,5 \cdot 10^{-6}$ с и $1,5 \cdot 10^{-5}$ с;

- V_m регулируется плавно в пределах от долей вольта до 4 киловольт.

3. Внутреннее сопротивление генератора 50 Ом.

4. Возможность ручного запуска и внешней синхронизации ОИН.

Схема генератора должна обеспечивать возможность контроля уровня воздействия (V_m), а также параметров напряжений и токов на испытуемых выводах ИС в процессе испытаний.

Обзор отечественной и зарубежной литературы показал, что промышленностью не выпускается генераторов ОИН с необходимыми параметрами. Наиболее близким техническим решением к требуемому является генератор импульсов напряжения с субнаносекундным фронтом, разработанный институтом электрофизики УрО РАН, содержащий в качестве коммутатора ртутный геркон с электромагнитом и позволяющий получить импульсы напряжения с амплитудой до 3,5 кВ на нагрузке 50 Ом при длительности импульсов до 10 нс.

В разработанном генераторе ОИН была существенно увеличена величина коммутируемого герконом тока, что позволило:

- увеличить амплитуду напряжений генерируемых на низкоомной нагрузке (25...50 Ом) до 4 кВ, при этом амплитуда коммутируемого ртутным герконом тока достигает 160 А;

- расширить диапазон длительностей ОИН до 10 мкс;

- предотвратить сваривание контактов ртутного геркона при работе генератора в режиме экстремальных нагрузок величиной до 25 Ом.

Результаты аттестации показали соответствие измеренных параметров выходного напряжения генератора ОИН заданным требованиям. Разработана типовая структура экспериментальной установки для проведения испытаний КМОП/КНС ИС на ИЭП, пригодная для проведения испытаний сложно-функциональных ИС.

Для контроля хода испытаний используется анализ осциллограмм напряжения и тока при воздействии ОИН на испытуемый вывод. К основным признакам состояний, предшествующих тепловому вторичному пробою при воздействии ОИН относятся: искажение

формы импульса выходного напряжения в области напряжений лавинного пробоя и появление осцилляций тока за счет развития механизмов токовой неустойчивости в режиме вторичного пробоя. Определение такого состояния позволяет уменьшить шаг амплитуды ОИН в этой области и более точно определить уровень ИЭП.

С целью повышения производительности и достоверности проведения испытаний, а также с целью исключения влияния субъективного фактора была разработана методика и программное обеспечение, позволяющее более точно оценить уровень амплитуды ОИН, предшествующий тепловому вторичному пробоя, определить энергию повреждения.

В пятой главе приведены результаты апробации разработанных методов и технических средств проведения испытаний.

Экспериментальная апробация разработанных методов и средств испытаний на ИЭП проводилась со следующими целями:

- отработка процедуры проведения испытаний с учетом специфики КМОП/КНС ИС и проверка работоспособности стенда;
- сравнение показателей импульсной электрической прочности КМОП/КНС ИС с результатами испытаний объемных КМОП ИС;
- проверка адекватности разработанных и представленных выше моделей повреждения КМОП/КНС ИС под действием ОИН;
- выработка рекомендаций по применению КМОП/КНС ИС в аппаратуре военного и специального назначения.

В период с 2003 по 2009 годы испытаниям на ИЭП подвергались более 120 типов цифровых КМОП ИС, включая КМОП/КНС и КМОП/КНИ микросхемы. В классе КМОП/КНС ИС испытывались 17 типов ИС.

Результаты испытаний показали, что для КМОП/КНС ИС характерен более низкий коэффициент корреляции между значениями параметров ЭИП (V_m) и энергией повреждения (J_m), а также, более широкий диапазон разброса значений ИЭП для различных типов изделий. Это может быть, в частности, связано с недостаточной отработанностью КМОП/КНС технологии по сравнению с объемной.

Общим для полученных результатов является то, что при малой длительности ОИН (0,1 мкс) электрическая прочность КМОП/КНС ИС существенно ниже, чем у объемных КМОП ИС. В области средних длительностей (1,0 мкс) разница в уровнях прочности незначительна, а

при длительности ОИН 10 мкс КМОП/КНС ИС не уступают и даже несколько превосходят объемные.

Результаты исследований импульсной электрической прочности входных цепей испытанных КМОП/КНС ИС приведены на рис. 8 в виде графиков зависимостей максимально-допустимых значений ОИН от их длительности.

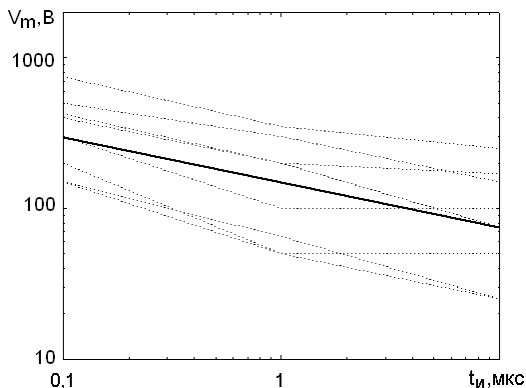


Рисунок 8 - Зависимости предельно-допустимых напряжений ОИН на входах КМОП/КНС ИС от длительности ОИН

Сплошной линией выделена линейная регрессия 1-го порядка от всех приведенных на каждом рисунке данных по ИЭП. Это соответствует зависимости

$$V_m \sim t_i^k,$$

где $k = -0,3$ для входных цепей и $k = -0,32$ для выходных цепей.

Приведенные в главе 3 результаты численных расчетов зависимости показателя ИЭП (V_m) от длительности ОИН для тонких структур дали значение коэффициента $k = 0,28$. Таким образом, результаты экспериментов над КМОП/КНС ИС подтвердили адекватность разработанной численной модели разогрева тонких структур под действием ОИН. Они подтвердили, в частности, что зависимость показателя ИЭП от длительности ОИН в данном случае существенно слабее, чем для КМОП ИС объемной или эпитаксиальной технологий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации заключаются в следующем:

1. На основании электромагнитного анализа взаимодействия ЭМИ с КМОП/КНС ИС, показано, что с расширением спектрального состава излучения растет доля поглощенной в кристалле ИС энергии. Однако, поглощенной в кристалле ИС энергии поля ЭМИ недостаточно для заметного энерговыделения и повреждения КМОП/КНС ИС. Поэтому непосредственным влиянием поля ЭМИ на кристалл КМОП/КНС ИС можно пренебречь.

2. По результатам электромагнитного и физико-топологического анализа типовой КМОП/КНС структуры показано, что в случае воздействия наводки от ЭМИ, поступающей по выводам, поглощенная энергия локализуется в небольших по размеру областях энерговыделения, что приводит к появлению опасных для работы ИС областей локального перегрева. Поэтому, действие ЭМИ может быть смоделировано воздействием на выводы ИС электрических сигналов от специализированных генераторов-имитаторов.

3. На основании анализа свойств КМОП/КНС ИС показано, что с уменьшением толщины приборного слоя кремния увеличивается ее сопротивление и плотность тока перегрузки. В результате характеристики защиты от ОИН могут ухудшаться. На основании одномерного электротеплового моделирования показано, что только при пропорциональном уменьшении всех размеров КНС-структуры максимальная температура с ростом степени интеграции увеличивается незначительно.

4. На основании двумерного численного электротеплового моделирования показано, что рост теплообмена с окружающей средой в КНС-структурах приводит к тому, что предположение об промежуточном характере нагрева (модель Вунша-Белла) в данном случае не работает и зависимость ИЭП от длительности ОИН слабее, чем предсказывает формула $V_m \sim t_n^{-1/2}$ с коэффициентом в показателе лежащем в диапазоне 0,28...0,32.

По результатам анализа показано, что импульсная электрическая прочность р-п переходов КНС ИС при воздействии ОИН двухэкспоненциальной формы примерно на 20-30% больше, чем при воздействии ОИН прямоугольной формы. Длительность фронта ОИН относительно слабо влияет на ИЭП структур.

Основные практические результаты диссертации заключаются в следующем:

1. На основании проведенных исследований и испытаний обоснованы параметры унифицированных видов ОИН, необходимые для определения ИЭП современных КМОП/КНС ИС.

2. Разработан и изготовлен генератор ОИН для определения ИЭП КМОП/КНС ИС, удовлетворяющий поставленной задаче. Проведена аттестация разработанного генератора, подтвердившая заданные электрические параметры ОИН.

3. Разработаны экспериментальная установка для проведения испытаний КМОП/КНС ИС на ИЭП. Установка позволяет проводить испытания всех типов КМОП/КНС ИС, включая сложно-функциональные. Разработана методика проведения испытаний ИС на стойкость к ОИН, учитывающая особенности КМОП/КНС ИС. Предложены методические и программные средства, повышающие достоверность проведения испытаний ИС на ИЭП

4. С целью проверки эффективности и достоверности разработанных методов и средств были проведены испытания ИЭП более 50 типов цифровых КМОП ИС, включая 17 типов КМОП/КНС микросхем. Общим для полученных результатов является то, что при малой длительности ОИН (0,1 мкс) электрическая прочность КМОП/КНС ИС существенно ниже, чем у объемных КМОП ИС. В области средних длительностей (1,0 мкс) разница незначительна, а при длительности ОИН 10 мкс КМОП/КНС ИС не уступают и даже несколько превосходят объемные.

5. Результаты экспериментов над КМОП/КНС ИС подтвердили адекватность разработанной численной модели разогрева тонких структур под действием ОИН. Они подтвердили, что зависимость уровня ИЭП от длительности ОИН для КМОП/КНС ИС слабее, чем для КМОП ИС объемной или эпитаксиальной технологий.

Таким образом, в ходе работы над диссертацией достигнута ее основная цель, а именно: разработаны научно обоснованные методы и средства испытаний КМОП микросхем на структурах «кремний-на-сапфире» на импульсную электрическую прочность, что позволит обеспечить комплектование устройств вычислительной техники и систем управления объектов военного и специального назначения современной элементной базой с высокими эксплуатационными характеристиками и повышенной стойкостью к воздействию ЭМИ естественного и искусственного происхождения.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Скоробогатов П.К., Барбашов В.М., Герасимчук О.А. Результаты испытаний ИС серии 1554ТБМ на импульсную электрическую прочность.//Научно – технический сборник «Радиационная стойкость электронных систем - «Стойкость –2003». Выпуск 6. М.: МИФИ, 2003. С. 105-106

2. Скоробогатов П.К., Барбашов В.М., Герасимчук О.А. Исследования совместного воздействия одиночных импульсов напряжения и ионизации на полупроводниковые структуры.//Научно – технический сборник «Радиационная стойкость электронных систем - «Стойкость –2003». Выпуск 6. М.: МИФИ, 2003. С. С.127-128.

3. Герасимчук О.А. Требования к параметрам генератора одиночных импульсов напряжения для проведения испытаний полупроводниковых изделий электронной техники на импульсную электрическую прочность//В сб.: Электроника, микро- и наноэлектроника. - М.: МИФИ, 2003. – С. 235-236.

4. Герасимчук О.А., Скоробогатов П.К., Поликанин А.С. Методика определения энергетических параметров импульсной электрической прочности полупроводниковых изделий электронной техники//Электроника, микро- и наноэлектроника. Сборник научных трудов/Под ред. В.Я.Стенина. – М.: МИФИ, 2004. С. 278-281.

5. Барбашов В.М., Герасимчук О.А., Поликанин А.С., Скоробогатов П.К. Сравнение импульсной электрической прочности КМОП ИС, выполненных по эпитаксиальной и КНС технологиям// В сб. Научная сессия МИФИ-2004. Том 1, сборник научных трудов. М.: МИФИ. 2004. с.183 -184.

6. Герасимчук О.А., Скоробогатов П.К., Поликанин А.С., Барбашов В.М. Влияние технологического исполнения на импульсную электрическую прочность КМОП ИС.//Научно-технический сборник: «Радиационная стойкость электронных систем – «Стойкость-2005». - М.: МИФИ, 2005, вып.8, с. 131-132.

7. Поликанин А.С., Герасимчук О.А., Каратонова Е.Н. Результаты испытаний ИС серии 1825 на импульсную электрическую прочность.//Научно-технический сборник: «Радиационная стойкость электронных систем – «Стойкость-2005». - М.: МИФИ, 2005, вып.8, с. 133-134.

8. Барбашов В.М., Герасимчук О.А. Оценка качества функционирования БИС при воздействии импульсов электрического

перенапряжения//В сб. научных трудов «Научная сессия МИФИ-2005». Том 1. М.: МИФИ, 2004. С. 175-176.

9. Барбашов В.М., Епифанцев К.А., Герасимчук О.А., Скоробогатов П.К. Анализ взаимосвязи нечеткости и неопределенности в оценке качества функционирования БИС при воздействии одиночного импульса напряжения//Научно-технический сборник: «Радиационная стойкость электронных систем – «Стойкость-2006». - М.: МИФИ, 2006, вып.9, с. 121-122

10. Епифанцев К.А., Барбашов В.М., Герасимчук О.А. Сравнение импульсной электрической прочности КМОП ИС одного типа, выполненных по КНС технологии разными производителями // В сб. Научная сессия МИФИ-2006. Том 1, сборник научных трудов, с.187-188.

11. Епифанцев К.А., Барбашов В.М., Герасимчук О.А. Влияние длительности одиночного импульса напряжения на отказы ИС вследствие вторичного пробоя //Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сборник научных трудов/Под ред. В.Я. Стенина. – М.: МИФИ, 2006. – с.200 – 201.

12. Епифанцев К.А., Барбашов В.М., Герасимчук О.А. Влияние параметров одиночного импульса напряжения на электрическую импульсную прочность КМОП ИС по параметрическому и функциональному отказу // В сб. Научная сессия МИФИ-2007. Том 15, сборник научных трудов, с.105-106.

13. Герасимчук О.А., Епифанцев К.А., Скоробогатов П.К. Анализ результатов испытаний ИС на импульсную электрическую прочность//Научно-технический сборник: «Радиационная стойкость электронных систем – «Стойкость-2007». - М.: МИФИ, 2007, вып.10, с. 163-164.

14. Герасимчук О.А. Зависимости уровней импульсной электрической прочности КМОП ИС от длительности одиночных импульсов напряжения//Научно-технический сборник: «Радиационная стойкость электронных систем – «Стойкость-2008». - М.: МИФИ, 2008, вып.11, с. 139-140

15. Барбашов В.М., Герасимчук О.А., Муравьева О.В. Повышение достоверности испытаний ИС на импульсную электрическую прочность// В сб. научных трудов «Научная сессия МИФИ-2008». Том 8. М.: МИФИ, 2008. С. 79-80.

16. Герасимчук О.А., Скоробогатов П.К. Анализ влияния электромагнитных излучений на изделия микроэлектроники//Научно-

технический сборник. «Радиационная стойкость электронных систем – «Стойкость-2009». М.: МИФИ, 2009, вып. 12. - С. 240-243.

17. Елифанцев К.А., Герасимчук О.А., Скоробогатов П.К. Расчетно-экспериментальное моделирование воздействия одиночных импульсов напряжения, вызванных электромагнитными импульсами, на интегральные схемы//Микроэлектроника, 2009, т.38, №4, с.284-301.

18. Герасимчук О.А., Скоробогатов П.К. Защита информации в изделиях микроэлектроники при воздействии электромагнитных излучений//Безопасность информационных технологий, 2009, №3, С. 111-115.