

На правах рукописи

Экз. №

КИРГИЗОВА АНАСТАСИЯ ВЛАДИСЛАВОВНА

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СБОЕВ
В МИКРОСХЕМАХ ЗАПОМИНАЮЩИХ УСТРОЙСТВ
НА СТРУКТУРАХ «КРЕМНИЙ-НА-САПФИРЕ»
ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ ИОНИЗИРУЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

- 05.27.01 - Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на
квантовых эффектах
- 05.13.05 - Элементы и устройства вычислительной техники и
систем управления

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:

Москва – 2007 г.

Диссертация выполнена в Московском инженерно-физическом институте (государственном университете).

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

Официальные оппоненты: Улимов Виктор Николаевич,
доктор технических наук.

Волков Святослав Игоревич,
кандидат технических наук.

Ведущая организация: ФГУП «22 ЦНИИИ Минобороны России».

Защита состоится 16 апреля 2007 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.02 в МИФИ по адресу: 115409 Москва, Каширское шоссе, 31, тел. 324-84-98, 323-91-76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ.

Автореферат разослан 16 марта 2007 г.

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

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор

Г.В. Петров

Общая характеристика работы

Диссертация направлена на решение научно-технической задачи прогнозирования эффектов функциональных сбоев в микросхемах запоминающих устройств на структурах «кремний-на-сапфире» при импульсных ионизирующих воздействиях с предельными уровнями (до 10^{13} ед/с), имеющей существенное значение для создания новых и совершенствования существующих радиационно-стойких элементов и устройств систем управления военного, космического и другого специального назначения, повышения их функциональных и эксплуатационных характеристик, а также эффективности применения.

Актуальность темы диссертации. Технические и эксплуатационные характеристики перспективных систем управления и контроля во многом обусловлены техническим уровнем входящих в их состав запоминающих устройств (ЗУ) – электронных узлов, реализующих функции записи, хранения и считывания информации. Оперативные и постоянные ЗУ (ОЗУ и ПЗУ) реализуются в виде больших и сверхбольших интегральных схем (БИС и СБИС). Основным элементно-технологическим базисом БИС ЗУ в настоящее время является КМОП (на комплементарных транзисторах метал-окисел-полупроводник (МОП)).

Современные технические требования, предъявляемые к аппаратуре и, соответственно, элементной базе систем управления (СУ) военной и специальной техники, а также физического эксперимента, определяют условия их эксплуатации при радиационных воздействиях, среди которых наибольшим поражающим действием по отношению к изделиям микроэлектроники (по энергетическому критерию) обладает импульсное ионизирующее воздействие (ИИВ). При этом одними из наиболее уязвимых элементов современных электронных систем к ИИВ являются БИС ЗУ.

Основными показателями стойкости БИС ЗУ к ИИВ являются (1) предельный уровень воздействия, при котором не происходит необратимых отказов БИС; (2) уровень сохранности информации (УСИ) – максимальный уровень воздействия, при котором обеспечивается сбоеустойчивость – неискаженное хранение, считывание и запись (для ОЗУ) заданного информационного кода; а также (3) уровень бессбойной работы (УБР) – максимальный уровень ИИВ, при котором все параметры БИС находятся в пределах установленных норм.

Заданные требования по «выживанию» БИС ЗУ в составе стратегических систем при предельных уровнях ИИВ в диапазоне $10^{12} \dots 10^{13}$ ед/с и сбоеустойчивости не менее 10^{11} ед/с, а в ряде случаев до $(1 \dots 5) \cdot 10^{12}$ ед/с, являются практически недостижимыми для БИС ЗУ на объемных монокремниевых и эпитаксиальных структурах. Это обуславливает необходимость построения БИС ЗУ на структурах с диэлектрической изоляцией элементов, например, кремний-на-изоляторе (КНИ), которые обеспечивают существенное снижение ионизационных токов и подавление паразитных связей между элементами БИС при ИИВ. Исторически первой и до настоящего времени практически единственной промышленно освоенной отечественной КНИ технологией для ЗУ является кремний-на-сапфире (КНС). За последние 10 лет

созданы отечественные КМОП КНС БИС ЗУ (серия 1620), обеспечивающие уровни сбоеустойчивости ОЗУ $(1...5)10^{10}$ ед/с для информационной емкости (4...8) Кбит и 10^{12} ед/с для информационной емкости (2...4) Кбит. Достигнутый уровень КНС ЗУ по соотношению «информационная емкость – сбоеустойчивость» обеспечивает потребности ранее разработанных бортовых СУ сегодняшнего дня, но не достаточен для интеллектуальных сложно-функциональных СУ нового поколения, находящихся в разработке. Ближайшими задачами являются создание БИС ОЗУ емкостью (32...64) Кбит и БИС ПЗУ 512 Кбит...1 Мбит с уровнем сбоеустойчивости не менее 10^{11} ед/с и БИС спецОЗУ емкостью не менее (8...16) Кбит с уровнем сбоеустойчивости $(1...5)10^{12}$ ед/с, что находится на пределе (а в ряде случаев - и за пределами) возможностей как отечественной технологии микроэлектроники, так и техники радиационного эксперимента.

Необходимость создания КМОП КНС БИС ЗУ с заданными соотношениями «информационная емкость - сбоеустойчивость», повышения их рабочих и эксплуатационных характеристик, а также эффективности применения определяет важность и актуальность научных задач исследования и моделирования закономерностей радиационного поведения БИС ЗУ и их элементов при ИИВ с предельными уровнями, разработки эффективных методов расчетно-экспериментального прогнозирования сбоеустойчивости БИС ЗУ в условиях запрета натуральных облучательных опытов и ограниченных возможностей моделирующих установок (МУ). На решение указанных задач на основе создания и развития методов и средств расчетно-экспериментального моделирования БИС ЗУ на КНС структурах при предельных уровнях ИИВ и направлена диссертация.

Состояние исследований по проблеме. Вопросам создания и развития КМОП КНС БИС ЗУ посвящены работы Полякова И.В., Герасимова Ю.М., Григорьева Н.Г., Антимирова В.М., Малкова В.И., Гуминова В.Н. и других специалистов. В результате были разработаны и успешно применены в аппаратуре отечественные КМОП КНС БИС ЗУ серии 1620 с рекордным уровнем сбоеустойчивости – до 10^{12} ед/с, подтвержденном в ходе испытаний. В трудах Петросянца К.О., Скоробогатова П.К. и Харитоновой И.А. развиты модели сбоев элементов КМОП КНС ЗУ, методики и первые результаты лазерных имитационных испытаний этих БИС получены в работах Никифорова А.Ю. и Барбашова В.М. Эффективные методики и технические средства тестирования БИС ЗУ в радиационном эксперименте проработаны Чумаковым А.И. и Яненко А.В.

Следует отметить, что многие важные вопросы моделирования и экспериментальных исследований механизмов сбоев в КМОП КНС БИС ЗУ при ИИВ были проработаны недостаточно. Большинство научных работ и публикаций по теоретическому анализу радиационных эффектов в БИС ЗУ при ИИВ было по существу направлено на моделирование эффектов в отдельных транзисторах и простейших базовых элементах БИС на их основе. Не уделялось должного внимания и моделированию реакции БИС ЗУ в целом, с учетом проявления и взаимного влияния локальных эффектов в отдельных элементах и интегральных эффектов «просадки» питания и радиационно-индуцированных

утечек через сапфировую подложку. Методы и технические средства лазерного имитационного моделирования были отработаны в основном для монокремниевых БИС и не учитывали существенные особенности КНС структур - субмикронные толщины приборных слоев, а также совместный учет эффектов в полупроводниковых и диэлектрических областях с учетом дополнительной специфики предельных уровней ИИВ (до 10^{13} ед/с). Имеющиеся средства эксперимента не обеспечивали возможности полноценного функционального контроля и диагностирования сбоев в реальных режимах работы БИС ЗУ непосредственно в процессе ИИВ.

Таким образом, диссертация направлена на разрешение научного противоречия, которое заключается одновременно в необходимости и невозможности обеспечить достоверное прогнозирование эффектов информационных сбоев в новом поколении КМОП ЗУ на КНС структурах при ИИВ с предельными уровнями, оставаясь в рамках имеющихся методов и средств теоретического и экспериментального моделирования без их научно-технического развития.

Целью диссертации является разработка научно обоснованных методических и технических средств прогнозирования эффектов функциональных сбоев в микросхемах запоминающих устройств на структурах «кремний-на-сапфире» при импульсном ионизирующем воздействии с предельными уровнями.

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

- теоретическим анализом, моделированием и экспериментальным исследованием закономерностей поведения и доминирующих радиационных эффектов в КМОП КНС БИС ЗУ и их элементах при импульсном ионизирующем воздействии с предельными уровнями;

- развитием метода лазерного имитационного моделирования для КМОП БИС ЗУ на КНС-структурах на основе рационального выбора длины волны излучения, что позволяет обеспечить адекватность моделирования доминирующих эффектов и многократный (в сотни-тысячи раз) рост информативного объема радиационных испытаний практически без увеличения затрат на их проведение;

- разработкой новых и совершенствованием существующих методических и технических средств испытаний КМОП КНС БИС ЗУ на стойкость к импульсному ионизирующему воздействию, обеспечивающих гибкое управление, выявление и диагностирование информационных сбоев в реальном времени непосредственно в процессе импульсного ионизирующего воздействия;

- получением и систематизацией оригинальных экспериментальных данных, устанавливающих общность радиационного поведения КМОП КНС БИС ЗУ в широких диапазонах изменения режимов работы и уровней импульсного ионизирующего воздействия (до группы 6Ус ГОСТ РВ 20.39.414.2).

Научная новизна работы:

1. Выявлены и систематизированы закономерности и особенности реакции на импульсное ионизирующее воздействие в широком диапазоне уровней до предельных и установлены доминирующие механизмы функциональных сбоев

КМОП КНС БИС памяти – ПЗУ и ОЗУ с различными вариантами реализации ячеек памяти и с предельно достижимыми для отечественной технологии проектными нормами и информационной емкостью.

2. Уровень сбоеустойчивости КМОП КНС БИС ЗУ при уровнях ИИВ до 10^{12} ед/с определяется преимущественно ионизацией полупроводниковых областей активных элементов и слабо зависит от реакции диэлектрических областей (подзатворного и изолирующего SiO_2 , а также Al_2O_3 -подложки), а при уровнях воздействия более 10^{12} ед/с - сопоставимым вкладом ионизации полупроводниковых и диэлектрических областей.

Реакция полупроводниковых областей до предельных уровней воздействия может быть адекватно описана в диффузионно-дрейфовом приближении с использованием программного комплекса «DIODE-2D», адаптированного для КНС-структур, а вклад диэлектрических областей подложки может быть учтен на основе модели ионизационной проводимости сапфира с использованием предположения об омическом характере переноса радиационно-индуцированных носителей. Определенное значение коэффициента ионизационной проводимости для отечественных КНС структур составило $\sigma_p = 4 \cdot 10^{-15} [\text{Ом} \cdot \text{см} (\text{рад}/\text{с})]^{-1}$.

3. Предложена обобщенная модель импульсного отклика базовых элементов КМОП КНС БИС ЗУ в составе оригинальной системы электрического моделирования «SOSR».

4. Обосновано применение методов лазерного имитационного моделирования в диапазоне предельных уровней воздействия до 10^{13} ед/с. Впервые обоснован рациональный выбор длины волны лазерного излучения с максимальной энергетической эффективностью для КНС структур: 0,8...0,9 мкм.

5. Впервые установлен и объяснен эффект влияния тестового информационного кода на уровень и характер функциональных сбоев КМОП КНС БИС ОЗУ при импульсном ионизирующем воздействии, вызванный взаимным влиянием и паразитной перезаписью информации между ячейками памяти, подключенными к общим разрядным шинам; при этом наиболее радиационно-чувствительным является код «диагональ».

Практическая значимость работы:

1. Разработаны методики и экспериментальный комплекс для исследования сбоеустойчивости КМОП КНС БИС ЗУ в реальном времени и в различных режимах работы при ИИВ.

2. Развита методика лазерных имитационных испытаний КМОП БИС памяти в диапазоне предельных уровней ИИВ (до 10^{13} ед/с), адаптированные для КНС структур.

3. Получены оригинальные результаты экспериментальных исследований сбоеустойчивости большинства типов отечественных КМОП КНС БИС памяти, созданных на различных предприятиях (ОАО «Ангстрем», ОАО «НПП «Сапфир», ФГУП ФНПЦ «НИИИС» и других).

4. Выявлено влияние схемно-топологических и конструктивно-технологической реализаций элементов БИС ЗУ на уровни сбоев, разработаны практические рекомендации по повышению сбоеустойчивости КМОП КНС БИС ОЗУ и ПЗУ в части рационального выбора схемотехники ячеек памяти, в том

числе, с применением защитных РС-цепей, а также организации цепи питания, и толщины приборного слоя, реализованные в ОКР по созданию КНС БИС ЗУ.

5. Результаты диссертации внедрены в ОАО «Ангстрем», «ОАО «НПП «Сапфир», ФГУП ФНПЦ «НИИИС», ФГУП «НПО Автоматики», ОАО «ЭНПО СПЭЛС» и ОАО «НИИМЭ и Микрон» при разработке и радиационных испытаниях большинства отечественных КМОП КНС БИС ЗУ – РУ2, РУ54, РУ6, РУ7, РУ8, РУ9, РЕ1, РЕ2, РЕ3, и других, а также аппаратуры систем управления на их основе – в частности в ракетных комплексах ЗМЗ7У2 и ЗК30.

6. Полученные в диссертации результаты реализованы в нормативных документах Минобороны России, в том числе в ОСТ В 11 073.013-2003 (ч.10) «Микросхемы интегральные. Методы испытаний на специальную стойкость и импульсную электрическую прочность», в РД В 319.03.52-2004 «Микросхемы интегральные и полупроводниковые приборы. Методы контроля радиационной стойкости на этапах разработки, производства и поставки. Общая методика лазерных имитационных испытаний в широком диапазоне уровней и длительностей импульсов специальных факторов, а также температуры среды», а также в более чем 20 методиках и протоколах испытаний КМОП КНС БИС ЗУ.

7. Результаты диссертации вошли в отчетные материалы по многочисленным НИР и ОКР («Колун», «Врач», «Такт-ОЗУ-64К», «Такт-ОЗУ-32К», «Такт-ПЗУ-1М», «Молот-1», «Маяк-Д», «Стек», «Мурена», «Омега» и др.), выполненных по заказам Минобороны РФ, Росатома, Роспрома, Роскосмоса и предприятий оборонного комплекса.

Результаты, выносимые на защиту:

1. Модели радиационного поведения базовых элементов КМОП КНС БИС памяти (ОЗУ и ПЗУ) при импульсных ионизирующих воздействиях с предельными уровнями (до 10^{13} ед/с), учитывающие вклад полупроводниковых и диэлектрических областей и обеспечивающие адекватное описание радиационного поведения элементов в диффузионно-дрейфовом приближении при снижении вычислительных затрат в 3...5 раз.

2. Обобщенная модель и методика расчетно-экспериментального электрического моделирования сбоев в КМОП КНС БИС ЗУ на основе программы «SOSR», что позволяет проводить анализ сбоев в схемах с уровнем сложности до 5000 транзисторов с учетом локальных эффектов (в ячейках памяти и усилителях считывания), а также интегральных эффектов («просадки» цепи питания и радиационно-индуцированных утечек в диэлектрической подложке).

3. Усовершенствованная методика лазерного имитационного моделирования эффектов сбоев в КМОП КНС БИС ЗУ при импульсном ионизирующем воздействии с предельными интенсивностями (до 10^{13} ед/с), основанная на оптимизации для КНС структур длины волны лазерного излучения в диапазоне 0,8...0,9 мкм, что обеспечивает адекватность моделирования при повышении энергетической эффективности воздействия на два порядка.

4. Общая методика экспериментальных исследований сбоеустойчивости КМОП КНС БИС ЗУ и реализующий ее аппаратно-программный комплекс, обеспечивающий полноценный функциональный и параметрический контроль

работоспособности БИС в реальном времени, в различных режимах работы непосредственно в процессе импульсного ионизирующего воздействия.

5. Оригинальные результаты экспериментальных исследований радиационного поведения и уровней информационных сбоев основных типов отечественных КМОП КНС БИС ЗУ при импульсном ионизирующем воздействии, подтверждающие обоснованность методических и технических средств прогнозирования сбоев и аттестации БИС ЗУ.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на 7-ой европейской конференции «Radiation and its Effects on Components and Systems» RADECS 2003 (Нидерланды, 2003 г.), российских научных конференциях «Радиационная стойкость электронных систем» (Лыткарино, 2002-2006 гг.); научных сессиях МИФИ (Москва, 2003-2007 гг.); научных конференциях «Электроника, микро– и наноэлектроника» (г.Пушкин 2002 г., г.Кострома 2003 г., г.Н.Новгород 2004 г., г.Вологда 2005 г., г.Гатчина 2006 г.); на научно-практических семинарах «Проблемы создания специализированных радиационно-стойких СБИС на основе гетероструктур» (г.Н.Новгород, 2004-2007 гг.).

Публикации: Основные результаты диссертации опубликованы в 36 работах (в период с 2003 по 2007 гг.), в том числе 4 без соавторов.

Объем и структура диссертации. Диссертация содержит 220 страниц, в том числе 118 рисунков, 19 таблиц, список литературы из 199 наименований и состоит из введения, пяти глав и заключения.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Анализ проблемной ситуации

Разработка перспективных СУ ракетно-космической техники (РКТ) ставит задачу создания номенклатуры новых КМОП КНС БИС ЗУ с сочетанием высокой сбоеустойчивости и информационной емкости, но ни одна из ранее разработанных БИС ЗУ в полной мере данным требованиям не удовлетворяет.

Анализ проблемной ситуации позволил выявить и обобщить основные предпосылки и мотивации диссертационной работы, представленные на рис.1.

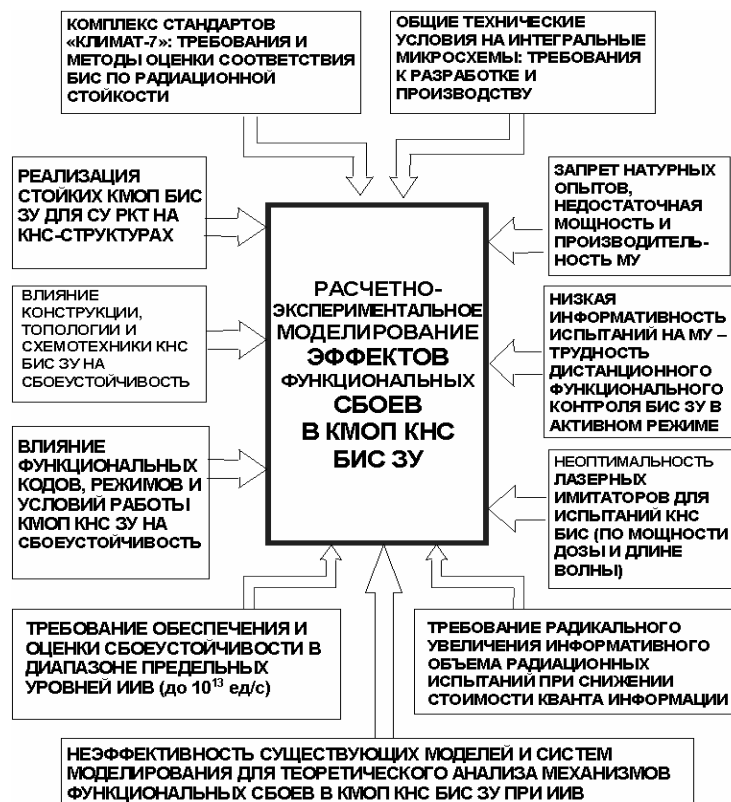


Рис.1. Проблемная ситуация с прогнозированием сбоеустойчивости КМОП КНС БИС ЗУ при ИИВ

Проведенные исследования показали, что имеющиеся на момент начала работы средства радиационного эксперимента и моделирования КНС БИС ЗУ не соответствовали уровню поставленных задач и требовали существенного развития. Анализ проблемной ситуации позволил констатировать отсутствие к началу работы единого подхода к моделированию доминирующих эффектов сбоев в КНС БИС ЗУ и их сравнительного вклада, особенно для предельных уровней ИИВ, подтвердил необходимость и актуальность темы и цели диссертации.

Моделирование доминирующих эффектов сбоев в элементах и микросхемах КНС ЗУ при ИИВ

Анализ и обобщение литературных и экспериментальных данных позволяет констатировать, что основными эффектами мощности дозы, определяющими проявление и характеристики функциональных и параметрических сбоев, а также катастрофических отказов КМОП КНС БИС ЗУ при ИИВ являются:

- ионизация и связанная с ней модуляция проводимости полупроводниковых (моно- и поликремниевых) областей: приборных слоев, резисторов и областей соединительных шин;
- образование ионизационных токов p-n переходов;
- отпирание паразитных диодных структур, накопление и релаксация зарядов в неподключенной подзатворной области;
- кратковременное уменьшение напряжений питания элементов за счет протекания ионизационных токов по шинам питания и общей;
- ионизация диэлектрических областей и образование токов утечки;
- тепловой вторичный пробой и пережог шин металлизации при

протекании значительных ионизационных токов при предельных уровнях ИИВ.

Перечисленные эффекты проявляются в БИС КНС ЗУ в виде радиационно-индуцированных изменений параметров, функциональных сбоев и отказов.

Ионизационные эффекты в полупроводниковых резистивных КНС структурах

Моделирование радиационно-индуцированной модуляции проводимости полупроводниковых областей (кремниевых и поликремниевых резисторов) проведено с использованием программного комплекса «DIODE-2D» при уровне ИИВ до 10^{13} ед/с. При времени жизни 1 нс расчетное значение уменьшения сопротивления (в 5,3 раза) удовлетворительно согласуется с полученными экспериментальными данными – в 6,6 раз (для легирования фосфором) и в 3,9 раз (для легирования бором) с учетом неопределенности данных и разброса значений параметров. Эффект модуляции проводимости снижается с ростом концентрации примесей. Экспериментально установлено, что при одинаковых уровнях ИИВ степень модуляции кремниевых резисторов превосходит модуляцию аналогичных поликремниевых областей.

Ионизационные эффекты в полупроводниковых структурах КНС ЗУ

С целью исследования особенностей формирования и релаксации ионизационных токов р-п переходов КНС МОПТ было выполнено расчетное моделирование («DIODE-2D») и экспериментальный анализ тестовых КНС МОПТ с типичными значениями параметров. Установлено, что зависимость ионизационного тока стокового р-п перехода от уровня ИИВ линейна до предельных уровней (10^{13} ед/с) (рис.2), при этом форма ионизационного тока закрытого КНС МОПТ повторяют форму ИИВ (рис.3).

Наличие продольного электрического поля в каналах открытых КНС МОПТ увеличивает амплитуду ионизационных токов (рис.4) и затягивает процесс релаксации (рис.5) по сравнению с закрытыми МОПТ. При этом плавающий потенциал подзатворной области оказывает существенное влияние на релаксационные процессы в КНС МОПТ и, соответственно, на время потери работоспособности КМОП КНС БИС ЗУ.

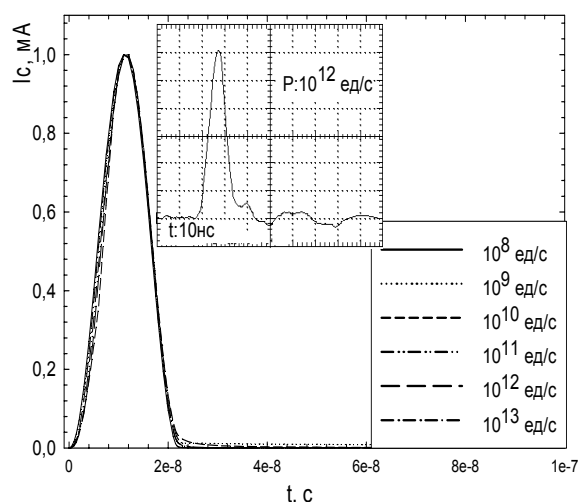
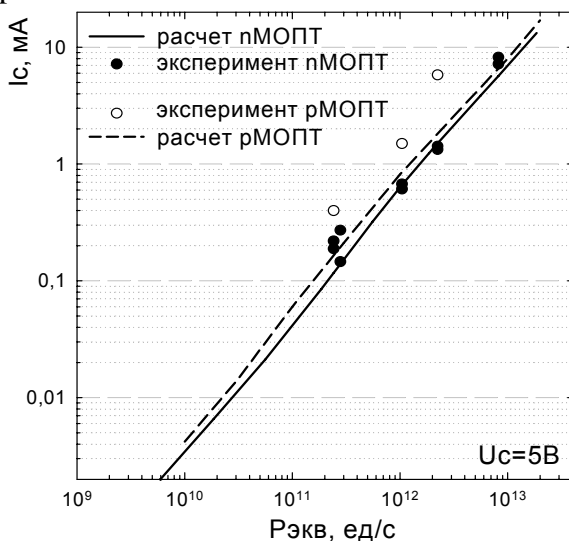


Рис.2. Расчетные и экспериментальные зависимости амплитуд I_c закрытых КНС р- и nМОПТ от ИИВ колоколообразной формы длительностью 11 нс. $U_c=5В$.

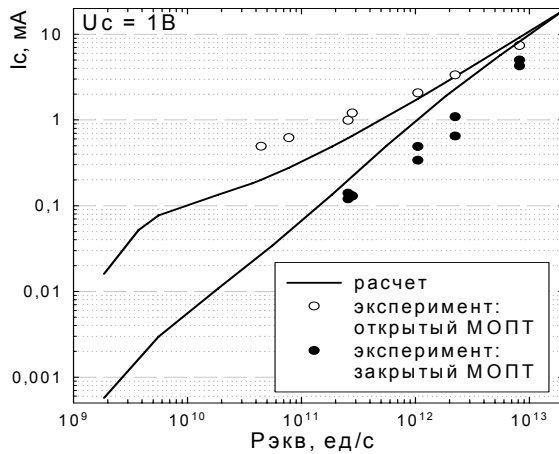


Рис.4. Сравнительные зависимости амплитуд ионизационного тока открытого и закрытого КНС nМОПТ от ИИВ длительностью 11 нс, $U_c=1В$.

Ионизационные эффекты в диэлектрических областях КМОП КНС БИС ЗУ

В результате расчетно-экспериментального моделирования установлено, что ионизационная проводимость сапфира имеет омический характер, т.е. зависимости радиационно-индуцированного тока утечки от приложенного напряжения (рис.6) и от мощности дозы являются линейными, а форма ионизационного отклика в сапфире повторяет форму ИИВ. Результаты экспериментальных исследований тестовых КНС-структур на МУ «РИУС-5» позволили оценить коэффициент ионизационной проводимости сапфира: $\sigma_p = 4 \cdot 10^{-15} [Ом \cdot см \cdot (рад/с)]^{-1}$. Установлено, что вклад полупроводниковых областей в реакцию МОПТ преобладает над вкладом сапфировой подложки (рис.7). С ростом мощности дозы относительный вклад сапфира в формирование сбоев КМОП КНС БИС ЗУ растет и при уровнях ИИВ более 10^{12} ед/с вклад токов полупроводниковых и диэлектрических структур становятся сопоставимыми.

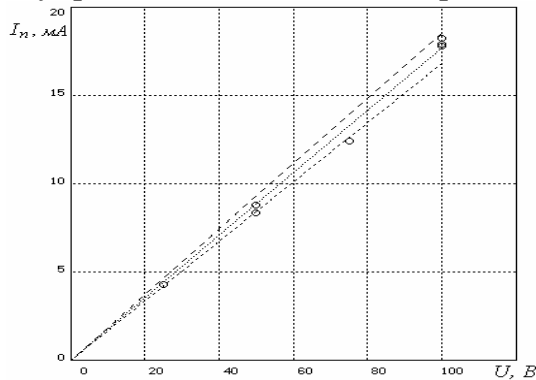


Рис.3. Расчетные формы ионизационного тока КНС nМОПТ при ИИВ колоколообразной формы длительностью 11 нс; на вставке – осциллограмма тока при $R_{экв}=10^{12}$ ед/с

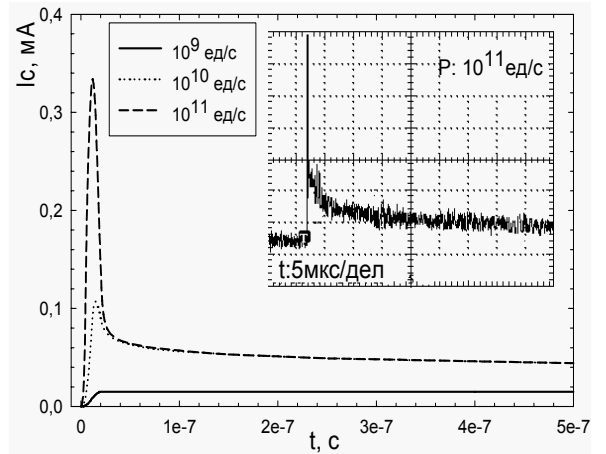


Рис.5. Расчетные формы ионизационного тока открытого КНС nМОПТ при ИИВ длительностью 11 нс; на вставке – осциллограмма тока при $R_{экв}=10^{11}$ ед/с

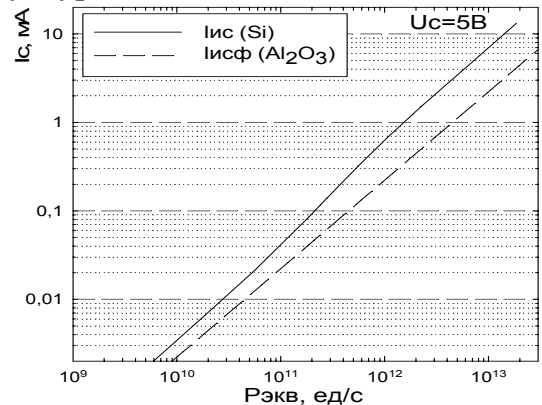


Рис.6. Экспериментальная зависимость $I_n(U)$ при облучении тестовой структуры приведенная к мощности дозы $P_\gamma = 2,0 \cdot 10^{10}$ ед/с

Рис.7. Расчетные зависимости ионизационных токов в сапфире (Иисф) и в стоке открытого nМОПТ (Иис). при $U_c=5В$

В случае пропорционального (по всем координатам) масштабирования (при уменьшении длины канала до 0,5 мкм и менее) ионизационная проводимость сапфира начинает превалировать над реакцией кремниевых областей.

Схемотехническое моделирование доминирующих механизмов сбоев в КМОП КНС БИС ЗУ при ИИВ

Возможности конструктивно-топологического моделирования с использованием «DIODE-2D» на практике ограничены уровнем инвертора. Для моделирования радиационного поведения информационных трактов и фрагментов КНС БИС ЗУ необходим переход на схемотехнический уровень с использованием разработанных физико-топологических моделей.

Расчетно-экспериментальное схемотехническое моделирование сбоев в КМОП КНС БИС ЗУ проведено с использованием разработанного при участии автора программного комплекса «SOSR» и включает этапы моделирования КНС инверторов, ячеек памяти (ЯП) и тракта считывания. Модели МОПТ в «SOSR», параметры которых идентифицированы по экспериментальным данным, хорошо согласуются со стандартными BSIM-моделями. В качестве параметра, описывающего отклик МОПТ при ИИВ в «SOSR», заложено отношение амплитуды ионизационного тока при заданном уровне ИИВ (I_{ph}) к току открытого транзистора (I_0), что определяет возможность идентификации радиационных параметров моделей МОПТ по результатам расчетно-экспериментального конструктивно-топологического моделирования.

В результате расчетно-экспериментального моделирования эффектов просадки напряжения питания в БИС ОЗУ установлено, что уровень сохранности информации 6-и транзисторной ЯП определяется взаимодействием двух механизмов: выравнивания выходных потенциалов ЯП и одновременной «просадки» питания вследствие протекания ионизационных токов при ИИВ.

Типовая структурная схема моделирования тракта считывания информации из накопителя БИС ЗУ показана на рис.8 и содержит столбец ЯП, окончные драйверы дешифратора и элемент фиксации потенциалов битовых шин (BL и NBL) без учета импульсов ионизационной реакции по шинам питания.

Моделирование сбоев тракта считывания КНС ОЗУ при ИИВ проводилось для $N=64$ (типично для ОЗУ 4...8 Кбит); напряжения питания 5В; в ячейке X1 записана 1, а в остальных ячейках – 0. Сбой в ячейке X1 наступает при подаче ИИВ нормированной мощности $P_N \geq 0,025$ (рис.8в). В случае, когда напряжение на инверсной битовой линии NBL, формируемое суммарным фототоком невыбранных ячеек, оказывается близким половине питающего напряжения – наступает сбой. Исходя из данного условия в результате расчета при $U_{ип} = 5В$, $I_0 = 0,20$ мА, $T_i = 11$ нс и $N = 64$, условие наступления сбоя: $P_N > 0,020$.

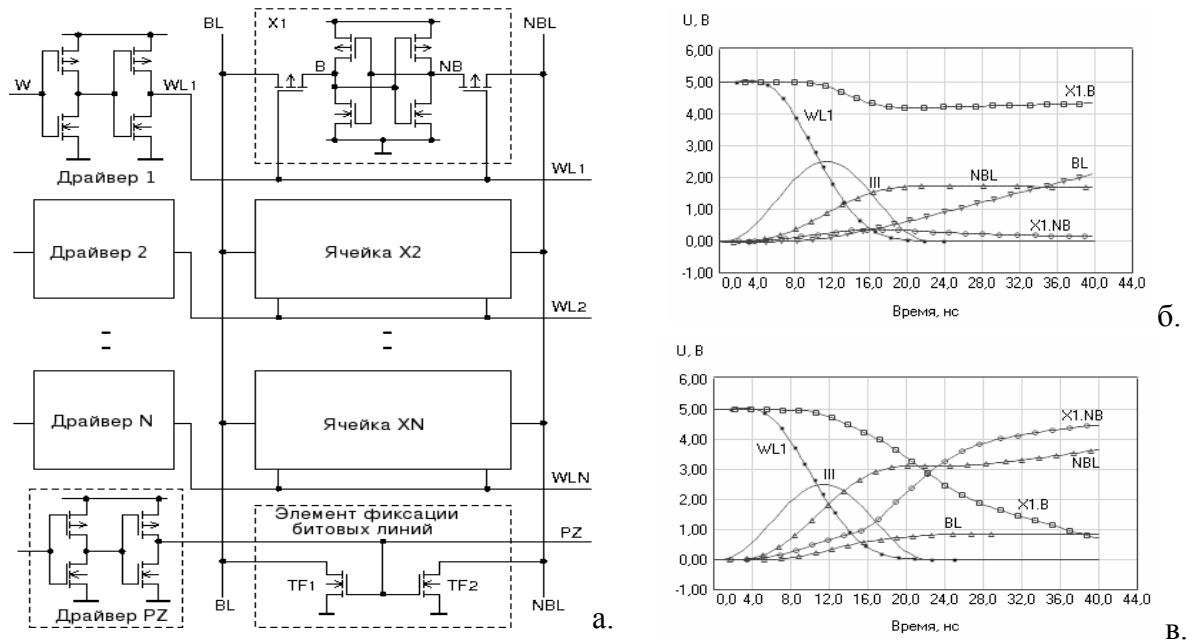


Рис.8. Структурная схема моделирования тракта считывания информации КНС БИС ОЗУ (а), рассчитанные временные зависимости напряжений в узлах накопителя в режиме чтения из ячейки X1 при отсутствии ИИВ (б) и при ИИВ длительностью 1нс и мощностью $P_N=0,025$ (сигнал III – форма ИИВ) (в)

В результате моделирования подтверждено, что накопитель БИС ОЗУ на основе 6-и транзисторной ЯП без RC-цепи, находящийся при ИИВ в режиме считывания информации, обладает наименьшим УСИ, а 10-и транзисторной ЯП с RC-цепью характеризуется наибольшим УСИ из всех исследованных вариантов.

Лазерное имитационное экспериментальное моделирование эффектов сбоев КМОП КНС ЗУ при предельных уровнях ИИВ

Тонкие приборные слои КМОП КНС ИС, дрейфовый характер переноса свободных носителей, малое время жизни неравновесных носителей в приборном слое (около 1 нс) и относительно низкая подвижность носителей зарядов ($\mu_e \approx 350 \text{ В/см} \cdot \text{с}^2$; $\mu_p \approx 250 \text{ В/см} \cdot \text{с}^2$) определяют особенности лазерного имитационного моделирования эффектов ИИВ на КМОП КНС ИС и требуют анализа его адекватности. По сравнению с ИС на монокремниевых структурах нелинейные ионизационные эффекты в КМОП КНС ИС проявляются в существенно меньшей степени, так как исходные времена жизни и значения подвижности носителей малы. Учет рассеяния на неравновесных носителях необходим при их концентрации свыше 10^{18} см^{-3} , что при времени жизни около 1 нс достигается при запредельных уровнях ИИВ - выше 10^{14} ед/с . Для длины волны лазерного излучения (ЛИ) 1,06 мкм, при значении коэффициента $\alpha \sim 14$, вклад двухфотонного поглощения не превышает 10% до интенсивностей порядка $2 \cdot 10^8 \text{ Вт/см}^2$, что соответствует приповерхностной эквивалентной мощности поглощенной дозы в КНС ИС $(2...3) \cdot 10^{14} \text{ ед/с}$. При интенсивности ЛИ до 10^7 Вт/см^2 КНС ИС не испытывают существенных дополнительных температурных и механических напряжений. Однако в ряде случаев за счет слоистой структуры и возможной неравномерности распределения энергии излучения, может возникнуть необходимость учета влияния термомеханических

эффектов при предельных интенсивностях ИИВ. Таким образом, для расчета зависимости эквивалентной мощности поглощенной дозы в кремнии в диапазоне сверхвысоких интенсивностей ЛИ достаточно учесть зависимость коэффициента поглощения от концентрации носителей заряда, а также влияние Оже-рекомбинации на время жизни носителей. Для обеспечения в приборном слое КМОП КНС БИС ЗУ эквивалентной мощности дозы 10^{13} ед/с при длине волны ЛИ с $\lambda=1,06\dots 1,08$ мкм необходима интенсивность порядка $(2\dots 3)\cdot 10^7$ Вт/см² (энергия импульса 0,25...2 Дж), которая может вызвать повреждение поверхности КНС БИС.

С целью обоснованного выбора рабочего диапазона длин волн ЛИ, обеспечивающего рациональное соотношение энергетической эффективности и адекватности моделирования КНС БИС, с учетом влияния неравномерности распределения интенсивности ионизации по глубине приборного слоя, экспериментально исследованы отклики тестовых КМОП КНС-инверторов на воздействие ЛИ в диапазоне длин волн 700...920 нм. В режиме облучения «сверху» получено значение коэффициента пересчета интенсивности ЛИ I_1 в эквивалентные (по эффекту) уровни импульсного γ -излучения $P_{\text{экв}} \cdot K_t = 1,6 \cdot 10^8 (1 - K_m)$ (рад(Si)/с)/(Вт/см²), где K_m – коэффициент металлизации. Это почти на два порядка превышает значение $K_t = 1,9 \cdot 10^6 (1 - K_m)$ (рад(Si)/с)/(Вт/см²) для ЛИ с длиной волны 1,06 мкм.

Характерные расчетные и экспериментальные зависимости амплитуды тока цепи питания КНС БИС ОЗУ 4 Кбит от длины волны ЛИ приведены на рис.9. Выбранная интенсивность ЛИ ($7,6 \cdot 10^3$ Вт/см²) гарантирует отсутствие заметных термомеханических напряжений в тонком приборном слое КНС БИС ОЗУ. Установлено, что уже при длине волны ЛИ 0,9 мкм обеспечивается близкий к предельному уровень тока цепи питания, который соответствует высоким значениям эквивалентной мощности поглощенной дозы. Установлено, что при переходе от длины волны ЛИ 1,06 мкм к 0,8 мкм эквивалентная мощность дозы возрастает с 10^{10} почти до 10^{12} рад(Si)/с без увеличения интенсивности излучения (рис.10).

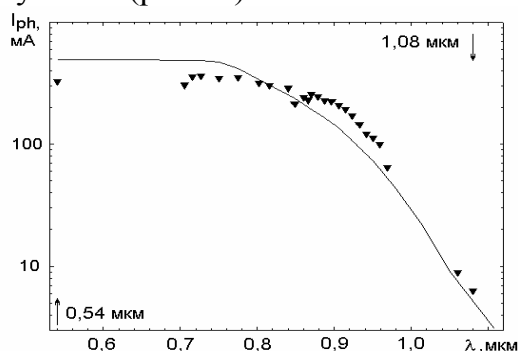


Рис.9. Расчетные и экспериментальные зависимости амплитуды тока цепи питания КНС БИС ОЗУ РУ2 от длины волны ЛИ при интенсивности $7,6 \cdot 10^3$ Вт/см²

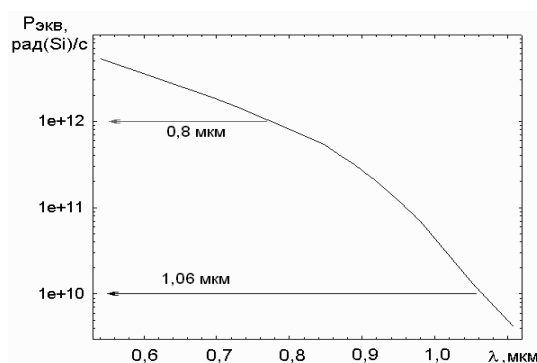


Рис.10. Расчетная зависимость эквивалентной мощности поглощенной дозы, создаваемой ЛИ при интенсивности $7,6 \cdot 10^3$ Вт/см² от длины волны излучения в ОЗУ РУ2

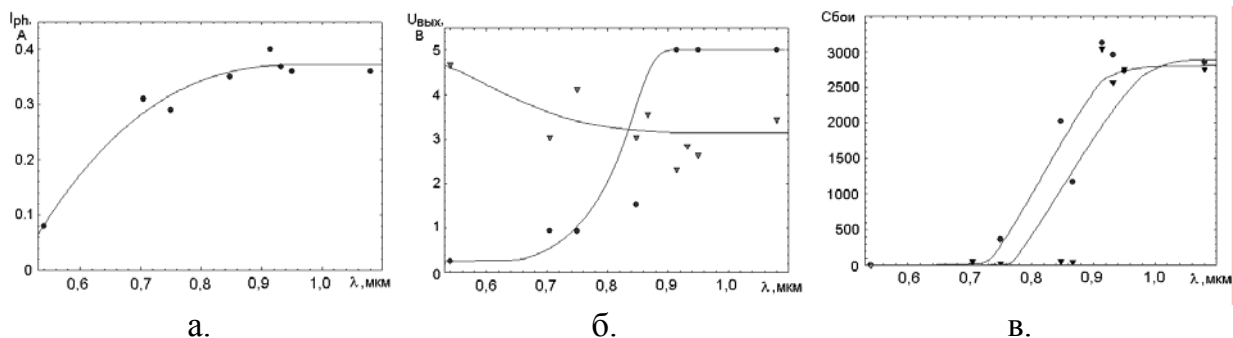


Рис.11. Экспериментальная зависимость (точки на графике) импульсной реакции тока потребления (а), выходных уровней (б), а также количества сбоев (в) КМОП КНС БИС ОЗУ РУ2 от длины волны ЛИ при постоянной эквивалентной мощности дозы $2,2 \cdot 10^{11}$ ед/с

Таким образом, адекватное моделирование при увеличении эквивалентной мощности дозы на два порядка обеспечивается при воздействии на КМОП КНС БИС ЛИ с длиной волны $0,8 \dots 0,9$ мкм при интенсивности до 10^5 Вт/см².

Основным ограничением лазерного имитационного моделирования эффектов ИИВ на КМОП КНС БИС ЗУ является отсутствие ионизации диэлектрических областей. Установлено, что предварительное дозовое воздействие до отказа не оказывало влияния на УСИ, а также величину и форму импульсной реакции тока потребления при последующем ИИВ до уровней ИИВ 10^{12} ед/с.

Анализ всей полноты эффектов в КМОП КНС БИС ЗУ при ИИВ, включая оценку влияния диэлектрических областей, корпуса и защитных покрытий кристалла, учет импульсного характера дозовых эффектов потребовали проведения экспериментальных исследований на МУ тормозного гамма-рентгеновского излучения, в том числе «ЛИУ-10», «РИУС-5», «АРСА». При этом использовались специальные средства подавления помех и наводок. В ходе испытаний на МУ проявлялись радиационно-индуцированные утечки, связанные с ионизацией окружающей среды, для снижения вклада которой кристаллы тестовых структур и БИС ЗУ заливались пчелиным воском или парафином.

Сопоставление эквивалентных ионизационных откликов БИС ОЗУ 2Кбит, полученных в экспериментах на МУ «ЛИУ-10» и лазерном имитаторе «РАДОН-8» показало отсутствие в обоих случаях информационных сбоев до уровней ИИВ порядка 10^{12} ед/с. Наблюдаемые сбои информации в БИС ОЗУ при уровнях более 10^{12} ед/с в ходе испытаний на МУ при их отсутствии в процессе лазерных имитационных испытаний можно объяснить эффектом радиационно-индуцированной просадки напряжения питания и помехами на внешних выводах. Наблюдаемый характер сбоя в этом случае можно воспроизвести принудительным кратковременным отключением напряжения питания.

Развитие методических и технических средств экспериментальных исследований КНС БИС ЗУ при ИИВ

Общая методика испытаний КМОП КНС БИС ЗУ на сбоеустойчивость

На основании обработки и анализа результатов значительного объема проведенных радиационных исследований различных типов КМОП КНС БИС ЗУ, можно сделать вывод, что уровень стойкости ЗУ зависит от:

функционального режима работы БИС во время воздействия (хранение, считывание, запись); тестового информационного кода (АФТ), записанного в матрицу памяти; порядка тестирования БИС после воздействия (считывание из всего массива или из одной ячейки памяти и т.п.); напряжения питания во время воздействия; электрического режима на входах и нагрузки на выходах БИС памяти в процессе воздействия. С целью достоверного определения УБР, учитывая перечисленные особенности, разработана общая методика радиационных испытаний КМОП КНС БИС ЗУ, успешно апробированная при испытаниях большинства типов отечественных КМОП КНС БИС ЗУ.

Оценки показывают, что для определения УСИ типовой КНС БИС ОЗУ требуется около 2500 импульсов воздействия. Обосновано, что решение проблемы резкого возрастания объема испытаний БИС на стойкость к ИИВ с учетом режимов работы и внешних условий, обеспечивается рациональным применением лазерных имитаторов для основного объема (более 98%) испытаний и МУ для калибровки и верификации лазерных имитационных испытаний.

Экспериментальный комплекс для исследования сбоеустойчивости БИС ЗУ

Основной объем экспериментальных исследований сбоеустойчивости КМОП КНС БИС ЗУ в диссертации проведен на разработанном при участии автора аппаратно-программном испытательном комплексе АПИК-0501.

В качестве основного источника ИИВ при испытаниях КМОП КНС БИС ЗУ впервые использован лазерный имитатор «РАДОН-8М» с дополнительным преобразователем длин волн излучения на основе $Al_2O_3: Ti^{3+}$ лазера, обеспечивающий необходимую энергию и длительность импульсов в диапазоне длин волн 0,70...0,92 мкм, где достигается максимальная энергетическая эффективность ионизации приборных слоев БИС на КНС структурах. Проведена также адаптация методики дозиметрического сопровождения лазерных имитационных испытаний для БИС ЗУ на КНС-структурах.

Отличительной особенностью программного обеспечения экспериментального комплекса является возможность оперативного отображения на экране монитора карт данных и сбоев в ячейках при ИИВ, статистики сбившихся ячеек по разрядам и идентификация адреса и кода ошибки. В ходе работы над диссертацией были разработаны программные модули функционального контроля КМОП КНС БИС ЗУ с организациями 512x4, 4Kx1, 1Kx8, 4Kx8 (ОЗУ); 2Kx8, 4Kx8, 32Kx16 (ПЗУ).

Результаты экспериментальных исследований КМОП КНС БИС ЗУ

Разработанные методические и технические средства были отработаны и опробованы в ходе экспериментальных исследований и испытаний широкой номенклатуры - практически всех типов отечественных КМОП КНС БИС ОЗУ и ПЗУ, разработанных в период 2000-2007 гг.

Сводная гистограмма значений УСИ КМОП КНС БИС ОЗУ в зависимости от информационной емкости, числа транзисторов и наличия РС-цепей в ЯП представлена на рис.12. Максимальная фактически достигнутая информационная емкость КМОП КНС БИС ОЗУ в настоящее время составляет 32Кбит при относительно низких экспериментально установленных значениях УСИ.

Применение дополнительных RC-цепей и специальная 8- или 10-транзисторная схемотехника ЯП существенно повышает сбоеустойчивость ОЗУ, но резко увеличивает площадь ЯП и, соответственно, снижает информационную емкость ОЗУ – до уровня не более 8Кбит при проектных нормах 1,2 мкм.

Полученные результаты показывают, что разработанные методические и технические средства экспериментальных исследований позволяют достоверно и эффективно исследовать практически все основные закономерности и особенности эффектов сбоев в КМОП КНС БИС ЗУ при ИИВ.

Реализация методов прогнозирования и обеспечения сбоеустойчивости КМОП КНС БИС ЗУ при ИИВ

Схемно-топологические методы обеспечения сбоеустойчивости КНС БИС ЗУ

Основными схемно-топологическими методами обеспечения сбоеустойчивости КМОП КНС БИС ЗУ являются: введение дополнительных МОПТ в стандартную 6-и транзисторную ЯП с целью обеспечения симметрии токов, протекающих при ИИВ; введение в ЯП RC-цепей; фиксация потенциалов подложек МОПТ; уменьшение ширины канала МОПТ связи; симметрия топологической конфигурации ЯП.

Стандартная 6-транзисторная ЯП позволяет реализовать ОЗУ значительной емкости (при нормах 1,2 мкм - до 64Кбит), однако уровень сбоеустойчивости таких схем ИИВ не превышает $5 \cdot 10^{10}$ ед/с. Полученные результаты моделирования и экспериментальных исследований показывают, что для реализации БИС ОЗУ с уровнем сбоеустойчивости более 10^{11} ед/с необходимо вводить в ЯП специальные RC-цепи в качестве дополнительных динамических элементов памяти. Подключение RC-цепей обеспечивается следующими способами (рис.13).

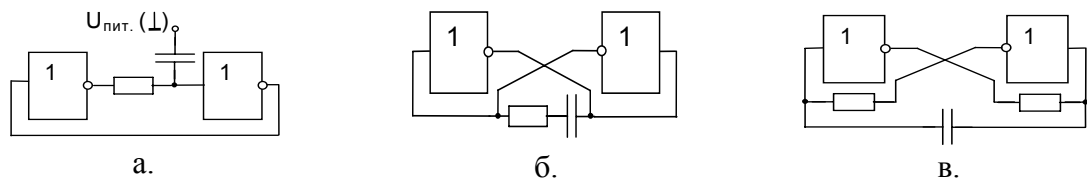


Рис.13. Основные способы подключения RC-цепи к узлам триггера ячейки памяти: (а) последовательное подключение конденсатора; (б) параллельное подключение конденсатора между выходами «плеч» триггера; (в) параллельное подключение конденсатора между входами «плеч» триггера

В разработанном при участии автора варианте ЯП на рис.13в включение конденсатора позволяет в наилучшей степени обеспечить сохранность информации, так как входы оказываются развязанными от выходов, что позволяет ослабить влияние изменений выходных уровней «плеч» триггера на состояние триггера при ИИВ. Данный вариант включения RC-цепи успешно реализован в БИС ОЗУ РУ8, что позволило обеспечить УСИ при ИИВ не менее 10^{12} ед/с.

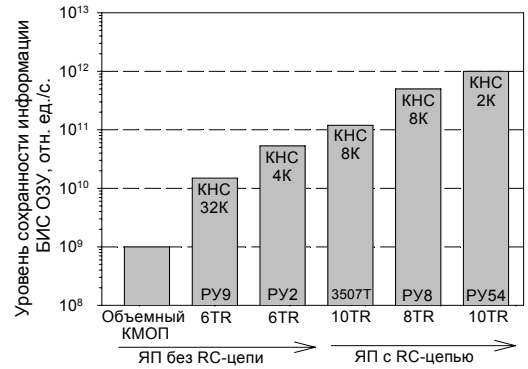


Рис.12. Сводная гистограмма УСИ КМОП КНС БИС ОЗУ при ИИВ

Оценки показывают, в условиях ограничений на площадь ячейки эффективным способом повышения сбоеустойчивости может оказаться объединение между собой подложек симметричных транзисторов даже без подключения к шинам земли или питания. Данный способ является наиболее универсальным и эффективен как для 6-, так и 8...10-транзисторных ЯП, позволяя дополнительно повысить устойчивость к ИИВ за счет обеспечения симметрии ЯП.

Уменьшение размеров транзистора связи ведет к увеличению УСИ за счет уменьшения ширины базы паразитного биполярного транзистора. Анализ полученных экспериментальных данных для КНС ОЗУ 2Кбит показывает, что уменьшение ширины канала рМОПТ связи ЯП в 1,3 раза с 6 мкм до 4,5 мкм при прочих равных условиях увеличивает УСИ до 1,5 раз.

Проведенная по результатам выявления и устранения потенциально «слабых» мест существенная переработка топологии ЯП КМОП КНС БИС ОЗУ РУ6 обеспечила максимальную топологическую симметрию ячеек памяти на основе параллельного подключения конденсатора между «плечами» триггера (рис.13в) и позволила достичь предельного уровня сбоеустойчивости.

Конструктивно-технологические методы обеспечения сбоеустойчивости КМОП КНС БИС ЗУ

Основными конструктивно-технологическими особенностями, влияющими на сбоеустойчивость КМОП КНС БИС ЗУ, являются толщина приборного слоя, уровень легирования резисторов в РС-цепи ЯП, а также технологический разброс параметров однотипных транзисторов в ЯП.

В результате экспериментальных исследований подтверждено, что снижение толщины приборного слоя с 0,6 мкм до 0,3 мкм приводит к эффективному увеличению УСИ (более 6 раз) без потери дозовой стойкости. Непропорциональность снижения УСИ относительно снижения толщины приборного слоя, связана с тем, что реальная толщина качественного приборного слоя в КНС-структуре, соответствующая области собирания носителей при формировании ионизационных токов, существенно отличается от номинального значения за счет дефектной области на границе с сапфиром. Дополнительное влияние оказывает различие времен жизни свободных носителей в приборных слоях каждой из толщин. Полученные результаты позволили скорректировать конструкцию КМОП КНС БИС ОЗУ РУ2: переход на КНС структуры с толщиной приборного слоя 0,3 мкм практически без переработки топологии позволил обеспечить выполнение заданных требований по УСИ.

Анализ полученных экспериментальных данных тестовых БИС ОЗУ 2Кбит с разными уровнями легирования резистора в РС-цепи ЯП показывает, что увеличение уровня легирования и в 1,3 раза при прочих равных условиях приводит к увеличению УСИ более чем в 2 раза.

В результате сравнительных статистических экспериментальных исследований тестовых схем установлено, что рабочие токи транзисторов в ЯП КМОП КНС БИС ПЗУ с исходной 50% технологической неравномерностью параметров имеют близкую ионизационную реакцию, разброс которой находится в пределах 10%, это соответствует нестабильности импульсов

источника воздействия.

Таким образом, полученные в диссертации теоретические и экспериментальные результаты показывают, что рациональное применение описанных выше конструктивно-технологических методов позволяет существенно повысить сбоеустойчивость КМОП КНС БИС ЗУ к ИИВ.

Влияние информационных кодов и режимов работы на сбоеустойчивость КМОП КНС БИС ЗУ

Даже оптимальные по топологии и параметрам ЯП не гарантируют достижение предельных значений УСИ БИС ОЗУ без учета эффектов взаимовлияния ячеек в столбце (рис.14).

С целью подавления взаимного влияния ЯП, находящихся в одном разрядном столбце целесообразно: (1) обеспечивать надежную фиксацию потенциалов разрядных шин в режиме хранения; (2) минимизировать паразитное сопротивление разрядных шин; (3) уменьшать помехи на выходах дешифраторов строк; (4) ограничивать количество ячеек памяти, объединенных по внутренней разрядной шине; (5) минимизировать ширину канала транзисторов связи, ограничивая ее только условием обеспечения надежной записи; (6) использовать транзисторы связи р-типа, при которых меньше проявляются паразитные эффекты (эффекты «плавающей подложки», и пр.).

Экспериментально установлено значение УСИ, которое при минимальном (4,5 В) напряжении питания вдвое ниже, чем при максимальном (7,5 В).

Исследования показали: 1) режим хранения отражает реакцию только накопителя и не позволяет достоверно оценить вклад цепей тракта считывания и записи ОЗУ; 2) в реальных условиях БИС памяти функционирует во всех возможных режимах, включая запись и динамическое считывание. Полученные значения сбоеустойчивости КМОП КНС БИС ОЗУ по различным критериям в режимах хранения, записи и чтения представлены на рис.15. Влияние режимов работы на сбоеустойчивость проявляется и в КМОП КНС БИС ПЗУ (рис.16).

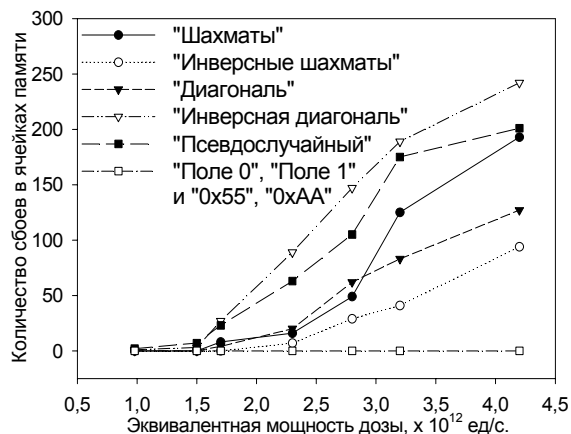


Рис.14. Зависимость количества ЯП, по которым зафиксирована потеря информации в режиме хранения различных информационных кодов

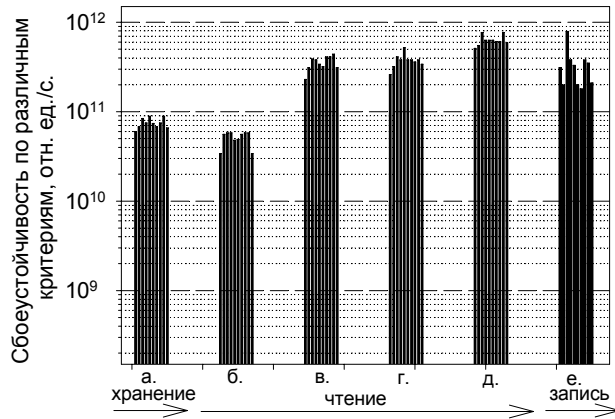


Рис.15. Относительные значения УСИ БИС ОЗУ РУ2: хранение (а); чтение (б); чтение по критериям $U_{\text{вых1}} < U_{\text{вых1.мин}}$ (в), $U_{\text{вых0}} > U_{\text{вых0м}}$ (г) и переключения $U_{\text{вых0.м}}$ (д); запись (е)

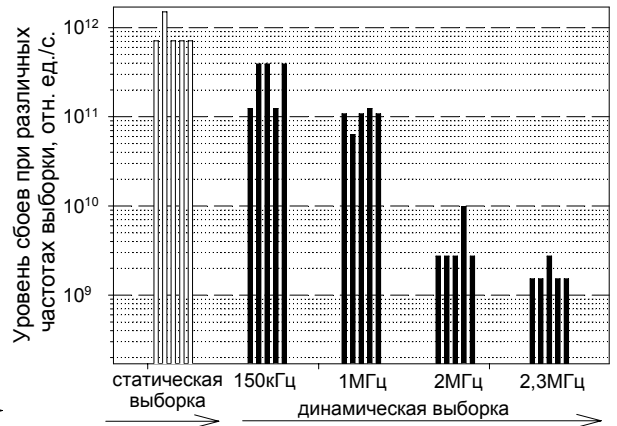


Рис.16. Относительные значения УСИ КМОП КНС БИС ПЗУ РЕЗ в различных режимах выборки

Сравнительные исследования сбоеустойчивости КМОП БИС ОЗУ на КНС и КНИ структурах при ИИВ

Основной тенденцией развития стойких КМОП СБИС ОЗУ большей информационной емкости (уровня 1Мбит) является их реализация на КНИ структурах. При этом актуальными являются вопросы: (1) как переход с КНС на КНИ-структуры отразится на показателях радиационной стойкости эквивалентных БИС ОЗУ, в частности, насколько применимы развитые в работе методы обеспечения и прогнозирования сбоеустойчивости к КНИ БИС ОЗУ и (2) каковы предельные возможности повышения стойкости субмикронной КНИ СБИС ОЗУ.

В ходе сравнительных экспериментальных исследований стойкости однотипных тестовых БИС ОЗУ на КНИ и КНС структурах выявлено – переход с КНС на КНИ-структуры в рамках единых правил проектирования и эквивалентных схмотехники и топологии, по меньшей мере, не приводит к снижению устойчивости БИС ОЗУ к эффектам мощности дозы (рис.17 и рис.18) и дозы при потенциальной возможности обеспечения существенно большей информационной емкости.

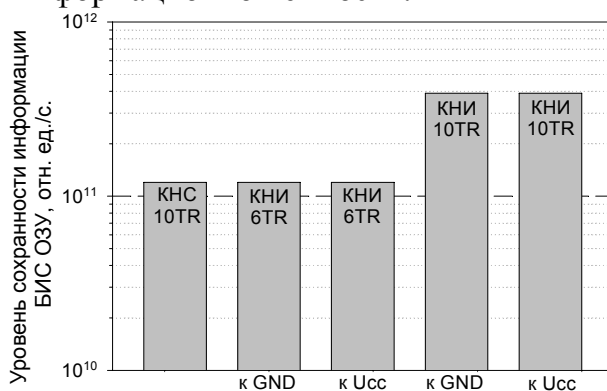


Рис.17. Гистограмма уровней сохранности информации КМОП КНС и КНИ БИС ОЗУ при ИИВ

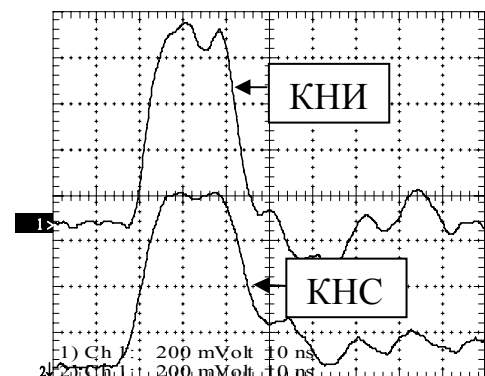


Рис.18. Осциллограммы импульсного тока потребления КМОП КНС и КНИ БИС ОЗУ при одинаковом ИИВ

Экспериментальное исследование КНИ СБИС ОЗУ 1Мбит NH6228, ф.Honeywell, которую можно принять в качестве «эталонной» в области создания стойких схем памяти показало, что отработанные современный КНИ техпроцесс и эффективные схемно-топологические решения действительно способны обеспечить сочетание высокой информационной емкости (1Мбит) и радиационной стойкости (уровень катастрофических отказов 10^{12} ед/с, уровень сбоеустойчивости 10^{11} ед/с, уровень дозовой стойкости – более 10^6 ед).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом диссертации является решение актуальной научно-технической задачи прогнозирования эффектов функциональных сбоев в микросхемах запоминающих устройств на структурах «кремний-на-сапфире» при импульсных ионизирующих воздействиях с предельными уровнями (до 10^{13} ед/с), имеющей существенное значение для создания новых и совершенствования существующих радиационно-стойких элементов и устройств систем управления военного, космического и другого специального назначения, повышения их функциональных и эксплуатационных характеристик, а также эффективности применения.

Основные научные результаты диссертации заключаются в следующем:

1. Разработана система расчетно-экспериментального моделирования эффектов функциональных сбоев в КМОП КНС БИС ЗУ при ИИВ с предельными уровнями (до 10^{13} ед/с) с учетом взаимосвязи локальных (в МОП-транзисторах) и интегральных («просадки» напряжения питания и «паразитной» связи элементов ЗУ по шинам питания и информационным) радиационных эффектов. В результате сопоставления полученных данных расчетного моделирования в диффузионно-дрейфовом приближении с использованием программного комплекса «DIODE-2D», адаптированного для КНС структур, и экспериментальных исследований установлено, что модуляция проводимости КНС резисторов при предельных уровнях ИИВ вызывает уменьшение сопротивлений полупроводниковых областей примерно в шесть раз для кремниевых и вдвое для поликремниевых структур. Зависимость ионизационного тока КНС p-n перехода от уровня ИИВ является линейной до предельных уровней. При этом плавающий потенциал подзатворной области оказывает существенное влияние на релаксационные процессы в КНС МОПТ и, как следствие, увеличивает время потери работоспособности КМОП КНС БИС ЗУ. Наличие продольного электрического поля в канале открытых КНС МОПТ обуславливает повышенные амплитуды ионизационных токов и время их релаксации по сравнению с закрытыми МОПТ.

2. В ходе расчетно-экспериментального моделирования обосновано, что в типовой КНС-структуре вклад полупроводниковых областей в реакцию МОПТ преобладает над вкладом сапфировой подложки до уровней ИИВ 10^{12} ед/с. При больших уровнях ИИВ, а также при масштабировании (длина канала менее 0,5 мкм) вклад ионизационной проводимости сапфира в общую реакцию МОПТ возрастает. Экспериментально выявлено, что ионизационная проводимость в сапфире отечественных КНС-структур имеет омический характер с коэффициентом ионизационной проводимости близким к $\sigma_p = 4 \cdot 10^{-15}$

$[\text{Ом}\cdot\text{см}(\text{рад}/\text{с})]^{-1}$. Форма ионизационного отклика в сапфире повторяет форму воздействия, что свидетельствует о малом времени жизни в сапфировой подложке (около 1 нс).

3. В результате расчетно-экспериментального исследования тестовых КНС инверторов, ячеек памяти и трактов считывания информации ОЗУ обоснована эффективность использования для электрического моделирования сбоев информационных трактов КНС БИС ОЗУ развитого в работе программного комплекса «SOSR», в котором отклик МОПТ на ИИВ характеризуется отношением амплитуды ионизационного тока при заданном уровне ИИВ к току открытого транзистора. Показано, что уровень сохранности информации в ЯП при ИИВ определяется взаимодействием двух радиационно-индуцированных механизмов: выравнивания выходных потенциалов ЯП и одновременной «просадки» питания вследствие протекания ионизационных токов. Предложена эквивалентная схема тракта считывания накопителя для схемотехнического моделирования сбоев КМОП КНС БИС ОЗУ при ИИВ, обеспечивающая анализ влияния схемотехники и режимов работы БИС ОЗУ на сбоеустойчивость. В результате моделирования подтверждено, что наименьшим УСИ обладает накопитель КМОП КНС БИС ОЗУ на основе шеститранзисторных ЯП без RC-цепи, находящийся при ИИВ в режиме считывания информации, а разработанные при участии автора десятитранзисторные ЯП с RC-цепью реализуют максимальный УСИ.

4. Тонкие приборные слои КМОП КНС ИС, дрейфовый характер переноса свободных носителей, малое время жизни неравновесных носителей в приборном слое и относительно низкая подвижность носителей зарядов обуславливают принципиальную возможность и адекватность лазерного имитационного моделирования воздействия импульсных ионизирующих излучений на КМОП КНС ИС. В результате расчетного моделирования и экспериментальных исследований зависимостей отклика тестовой КНС БИС ОЗУ от длины волны лазерного излучения обоснована применимость лазерного имитационного моделирования эффектов ИИВ в КНС БИС ОЗУ, что позволяет обеспечить многократный (в сотни тысячи раз) рост информативного объема радиационных испытаний практически без увеличения затрат на их проведение. Впервые теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что энергетически оптимальным для моделирования ионизационных эффектов в тонких приборных слоях КМОП КНС БИС является диапазон длин волн лазерного излучения 0,8...0,9 мкм, что обеспечивает достаточную эквивалентную мощность поглощенной дозы (до 10^{13} ед/с) при относительно низкой, неразрушающей интенсивности лазерного излучения.

5. Проанализированы и развиты схемно-топологические и конструктивно-технологические методы обеспечения сбоеустойчивости КМОП КНС БИС ОЗУ на основе рационального выбора схемных решений трактов считывания, совершенствования схемотехники и топологии ЯП, в том числе на основе оптимизации схемы подключения и параметров дополнительных RC-цепей, а также обоснованного снижения толщины приборного сбоя КНС-структур. Экспериментально показано, что даже оптимальные по топологии и схемотехнике ЯП не гарантируют достижения предельных значений

сбоеустойчивости БИС, если не учитывать эффекты взаимовлияния ячеек в столбце. Впервые установлены закономерности и объяснен эффект влияния вида тестового информационного кода на уровень и характер функциональных сбоев КМОП КНС БИС ОЗУ при ИИВ, вызванный взаимным влиянием и перезаписью информации между соседними ячейками памяти, подключенными к общим разрядным шинам, при этом, как правило, наиболее радиационно-чувствительным тестовым кодом является код «диагональ». Экспериментально подтверждено, что наиболее критичным для сбоев при ИИВ является работа БИС при пониженном напряжении питания, различие значений УСИ при минимальном и максимальном напряжениях питания может составлять около 2 раз. Установлено, что режим хранения информации при ИИВ не всегда является наихудшим, необходимо также контролировать сбоеустойчивость в режимах считывания (статического и динамического) и записи информации. В результате исследований установлено, что переходные процессы в периферийных схемах БИС ПЗУ наиболее сильно проявляются в динамических режимах работы с максимальной (предельной) частотой следования циклов, в результате чего уровень сбоеустойчивости БИС ПЗУ в статическом и динамическом режимах может различаться на два порядка.

Полученные и систематизированные оригинальные экспериментальные данные и зависимости хорошо соответствуют результатам теоретического моделирования и подтверждают общность радиационного поведения КМОП КНС БИС ЗУ в широких диапазонах изменения режимов работы и уровней ИИВ.

Основной практический результат диссертации заключается в разработке общей методики и экспериментального комплекса для исследования сбоеустойчивости КМОП КНС БИС ЗУ в реальном времени с учетом: предельных уровней ИИВ (до 10^{13} ед/с); возможных режимов работы: хранения, считывания (статического и динамического), записи; диапазона напряжений питания; различных видов АФТ и позволяющих выявлять доминирующие механизмы сбоев БИС ЗУ непосредственно в процессе и после ИИВ.

Частные практические результаты работы и их реализация:

1. Обосновано рациональное сочетание испытаний на лазерных имитаторах и моделирующих установках: при этом основной объем (более 98%) испытаний проводится на лазерном имитаторе, а испытания на МУ используются для калибровки и верификации результатов имитационных испытаний. В качестве основного источника ИИВ при испытаниях КМОП КНС БИС ЗУ впервые использован оригинальный лазерный имитатор «РАДОН-8М» с дополнительным преобразователем длин волн излучения на основе $Al_2O_3: Ti^{3+}$ лазера, обеспечивающий необходимую энергию и длительность импульсов в диапазоне длин волн 0,8...0,9 мкм. Проведена адаптация методики дозиметрического сопровождения лазерных имитационных испытаний для БИС ЗУ на КНС-структурах. Сравнительный экспериментальный анализ подтвердил непротиворечивость характеров радиационного поведения и уровней сбоеустойчивости КНС БИС ОЗУ, полученных в результате испытаний на моделирующих установках и лазерных имитаторах.

2. В результате анализа влияния схемно-топологических и конструктивно-

технологических особенностей элементов БИС ЗУ на уровне сбоеустойчивости разработаны практические рекомендации по повышению сбоеустойчивости КМОП КНС БИС ОЗУ и ПЗУ к ИИВ. Разработаны предложения по рациональной схемотехнике ЯП КМОП КНС БИС ОЗУ, направленные на обеспечение предельного уровня их сбоеустойчивости. Обоснована предпочтительность подключения конденсатора в RC-цепи параллельно между входами «плеч» триггера с одновременной развязкой входов и выходов «плеч» с помощью резисторов. Реализация 8-ми транзисторной ЯП позволила обеспечить УСИ БИС ОЗУ 8Кбит на уровне 10^{12} ед/с. Подтверждена необходимость фиксации потенциала областей каналов транзисторов. Теоретически обоснован и экспериментально верифицирован симметричный вариант топологии ЯП с RC-цепью, который был реализован в КМОП КНС БИС ОЗУ 2Кбита с предельным уровнем сбоеустойчивости (более 10^{12} ед/с). Отработан метод повышения УСИ БИС ОЗУ (на примере РУ2) на основе рационального уменьшения толщины приборного слоя с 0,6 мкм до 0,3 мкм - такое уменьшение толщины приборного слоя приводит к непропорциональному повышению УСИ КНС БИС ОЗУ – более чем в 6 раз без потери ее дозовой стойкости. Экспериментальными методами установлено также, что увеличение уровня легирования резисторов RC-цепи на 25% при прочих равных условиях приводит к увеличению УСИ более чем в 2 раза. Рабочие токи транзисторов в ЯП КМОП КНС БИС ПЗУ с исходной 50% технологической неравномерностью параметров имеют близкую ионизационную реакцию, разброс которой находится в пределах 10%, что соответствует нестабильности импульсов источника воздействия.

3. В результате сравнительных экспериментальных исследований эквивалентных по топологии и схемотехнике тестовых БИС ОЗУ на КНС и КНИ структурах, сделан вывод о том, что переход с КНС на КНИ структуры в рамках единых правил проектирования не приводит к снижению стойкости по эффектам дозы и мощности дозы. Оригинальные результаты экспериментальных исследований КНИ БИС ОЗУ 1М НХ6228 подтвердили принципиальную достижимость одновременно высоких информационной емкости (1Мбит) и радиационной стойкости.

Таким образом, в ходе работы над диссертацией **достигнута ее основная цель**, а именно: разработаны научно обоснованные методические и технические средства прогнозирования эффектов функциональных сбоев в микросхемах запоминающих устройств на структурах «кремний-на-сапфире» при импульсном ионизирующем воздействии.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Киргизова А.В., Яненко А.В., Никифоров А.Ю., Григорьев Н.Г. // Методика и результаты экспериментальных исследований сбоеустойчивости КМОП КНС БИС оперативных запоминающих устройств при импульсном ионизирующем воздействии / «Известия вузов. Электроника». – 2005. – №3. – С. 29-32.
2. Доминирующие механизмы информационных сбоев КМОП КНС БИС оперативных запоминающих устройств при воздействии импульсного ионизирующего излучения / А.В. Киргизова, А.Ю. Никифоров, Н.Г. Григорьев, И.В. Поляков и др. // «Микроэлектроника». – 2006. – Т.35. – №3. – С. 191-208.
3. Киргизова А.В. Аппаратно-программный измерительный комплекс для радиационных испытаний // Научная сессия МИФИ-2003. Сб. научн. трудов.

- «Молодежь и наука»: Тез. докл. – М.: МИФИ, 2003. С. 135.
4. Киргизова А.В. Влияние информационного кода на сбоеустойчивость КМОП КНС ОЗУ // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. научн. трудов. Т. 1 – М.: МИФИ, 2004. С. 321-325.
 5. А.В.Киргизова. Влияние реализации ячеек памяти на сбоеустойчивость КМОП КНС БИС ОЗУ // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. научн. трудов. Т. 1 – М.: МИФИ, 2005. С. 219-223.
 6. Киргизова А.В. Зависимость уровня сбоев постоянных запоминающих устройств от частоты выборки при импульсном ионизирующем воздействии // Научная сессия МИФИ-2005. Сб. научн. трудов. Т. 1 – М.: МИФИ, 2005. С. 189-190.
 7. Dominant Mechanisms of Transient-Radiation Upset in CMOS RAM VLSI Circuits Realized in SOS Technology / A.V.Kirgizova, et al. // Russian Microelectronics, 2006. – Vol.35. – №3. – pp.162-176.
 8. Influence of Temperature on Pulsed Laser SEE Testing / A.Y.Nikiforov, O.B.Mavritsky, A.N.Egorov, A.V.Kirgizova et al. // 7th European Conf. «Radiation and its Effects on Components and Systems» (RADECS 2003), Sept. 15-19, 2003, Noordwijk, The Netherlands, pp.153-155.
 9. Исследование влияния информационного кода и напряжения питания на сбоеустойчивость КМОП КНС БИС ОЗУ / А.В. Киргизова, А.В. Яненко, А.Д. Кузьмин, А.Я. Дубовик и др. // «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2004». – М.: МИФИ, 2004. Вып. 7. С. 45-46.
 10. Киргизова А.В., Яненко А.В., Поляков И.В. Исследование влияния сопротивления в RC-цепи ячейки памяти на сбоеустойчивость КМОП КНС БИС ОЗУ // «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2004». – М.: МИФИ, 2004. Вып. 7. С. 47-48.
 11. Исследование влияния режимов работы и критериев годности на уровень стойкости КМОП КНС БИС ОЗУ // А.В. Яненко, А.В. Киргизова, А.Д. Кузьмин, А.Я. Дубовик и др. / «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2004». – М.: МИФИ, 2004. Вып. 7. С. 65-66.
 12. Яненко А.В., Киргизова А.В., Шведов С.В., Усов Г.И. Результаты исследования радиационной стойкости тестовых БИС ОЗУ // «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2004». – М.: МИФИ, 2004. Вып. 7. С. 71-72.
 13. Согаян А.В., Киргизова А.В., Куркович А.И. Исследование радиационной реакции тестовых структур КМОП БИС ОЗУ // «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2004». – М.: МИФИ, 2004. Вып. 7. С. 99-100.
 14. Киргизова А.В., Яненко А.В. Влияние режима работы на сбоеустойчивость оперативных запоминающих устройств при импульсном ионизирующем воздействии // Научная сессия МИФИ-2005. Сб. научн. трудов. Т. 1 – М.: МИФИ, 2005. С. 191-192.
 15. Исследование радиационного поведения времени выборки КМОП БИС ПЗУ / А.В. Яненко, А.В. Киргизова, А.Г. Петров, А.А. Демидов и др. // Научная сессия МИФИ-2005. Сб. научн. трудов. Т. 1 – М.: МИФИ, 2005. С. 233-234.
 16. Согаян А.В., Давыдов Г.Г., Киргизова А.В., Поляков И.В. Исследование радиационно-индуцированной проводимости в системе Al/Al₂O₃/Al // «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2005». – М.: МИФИ, 2005. Вып. 8. С. 51-52.
 17. Киргизова А.В., Демидов А.А., Гуминов В.Н. Методика и сравнительные результаты статического и динамического тестирования сбоеустойчивости КМОП КНС БИС ПЗУ при импульсе ионизирующего воздействия // «Радиационная

- стойкость электронных систем – Стойкость-2005». – М.: МИФИ, 2005. Вып. 8. С. 55-56.
18. Исследование сбоеустойчивости КМОП КНС БИС ОЗУ с различными вариантами реализации ячеек памяти при импульсном ионизирующем воздействии / А.В. Киргизова, И.В. Поляков, А.Ю. Никифоров, Н.Г. Григорьев и др. // «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2005». – М.: МИФИ, 2005. Вып. 8. С. 57-58.
 19. Киргизова А.В., Скоробогатов П.К., Поляков И.В. Расчетная оценка модуляции проводимости кремниевых резисторов на подложке Al_2O_3 // «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2005». – М.: МИФИ, 2005. Вып. 8. С. 59-60.
 20. Киргизова А.В., Поляков И.В. Экспериментальное исследование эффекта радиационно-индуцированной модуляции кремниевых резисторов на подложке Al_2O_3 // «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2005». – М.: МИФИ, 2005. Вып. 8. С. 60-61.
 21. Контроль времени выборки данных КМОП БИС ПЗУ при дозовом воздействии / А.В. Яненко, А.В. Киргизова, А.Г. Петров, А.А. Демидов и др. // «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2005». – М.: МИФИ, 2005. Вып. 8. С.209-210.
 22. Киргизова А.В., Скоробогатов П.К., Поляков И.В. Модуляция сопротивления кремниевых резисторов на подложке Al_2O_3 при импульсном ионизирующем воздействии // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. научн. трудов. – М.: МИФИ, 2005. С. 219-223.
 23. Киргизова А.В., Григорьев Н.Г., Петров А.Г. Проблемы одновременного обеспечения высокой сбоеустойчивости и информационной емкости ОЗУ при применении RC-цепи в ячейках памяти // Научная сессия МИФИ-2006. Сб. научн. трудов. Т. 1 – М.:МИФИ, 2006. С. 185-186.
 24. Сравнительные исследования стойкости БИС ОЗУ на КНИ-структурах / А.В. Киргизова, А.Г. Петров, И.Б. Яшанин, С.В. Шведов и др. // «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2006». – М.: МИФИ, 2006. Вып. 9. С. 69-70.
 25. Исследование характера радиационного поведения КМОП КНИ БИС ОЗУ НХ6228 / А.Г. Петров, А.В. Киргизова, А.Ю. Никифоров, И.Б. Яшанин // «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2006». – М.: МИФИ, 2006. Вып. 9. С. 71-72.
 26. Киргизова А.В., Никифоров А.Ю. Анализ соотношения уровней «информационная емкость-сохранность информации» КМОП КНС БИС ОЗУ при импульсном ионизирующем воздействии // «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2006». – М.: МИФИ, 2006. Вып. 9. С. 75-76.
 27. Киргизова А.В., Петров А.Г., Никифоров А.Ю., Поляков И.В. Исследование влияния толщины приборного слоя на уровень стойкости КМОП КНС БИС ОЗУ // «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2006». – М.: МИФИ, 2006. Вып. 9. С. 77-78.
 28. Петров А.Г., Киргизова А.В., Гуминов В.Н. Исследования неоднородности токовых характеристик отклика ячеек памяти в составе КМОП КНС БИС ПЗУ 512К // «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2006». – М.: МИФИ, 2006. Вып. 9. С. 79-80.
 29. Скоробогатов П.К., Киргизова А.В., Петров А.Г., Егоров А.Н. Выбор оптимальных параметров лазерного излучения для моделирования переходных ионизационных эффектов в КМОП КНС БИС ОЗУ // «Радиационная стойкость электронных систем

- Стойкость-2006». – М.: МИФИ, 2006. Вып. 9. С. 179-180.
30. Лазерный имитатор ионизирующих излучений «РАДОН-8» на основе твердотельного $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ лазера с перестройкой длины волны / А.Ю. Никифоров, А.И. Чумаков, П.К. Скоробогатов, А.Н. Егоров и др. // «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2006». – М.: МИФИ, 2006. Вып. 9. С. 211-212.
 31. Киргизова А.В., Никифоров А.Ю. Прогнозирование сбоеустойчивости КМОП КНС БИС ЗУ при импульсном ионизирующем воздействии с предельной интенсивностью воздействия // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. научн. трудов. Т. 1 – М.: МИФИ, 2006. С. 176-184.
 32. Демидов А.А., Киргизова А.В., Яненко А.В. Структура измерителя времени задержки распространения цифровых ИС при радиационных испытаниях // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. научн. трудов. Т. 1 – М.: МИФИ, 2006. С. 213-216.
 33. Сравнительные исследования КМОП БИС ОЗУ на КНС- и КНИ-структурах при ионизирующих воздействиях / А.Г. Петров, А.В. Киргизова, И.Б. Яшанин, С.В. Шведов и др. // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. научн. трудов. Т. 1 – М.: МИФИ, 2006. С. 173-175.
 34. Киргизова А.В., Григорьев Н.Г. Программа «SOSResponse» для моделирования сбоев в КМОП КНС ИС ЗУ при импульсном ионизирующем воздействии // Научная сессия МИФИ-2007. Сб. научн. трудов. Т. 1 – М.: МИФИ, 2007. С. 175-176.
 35. Кессаринский Л.Н., Скоробогатов П.К., Киргизова А.В. Исследования ионизационной реакции КНС МОПТ при предельных уровнях импульсного ионизирующего воздействия // Научная сессия МИФИ-2007. Сб. научн. трудов. Т. 1 – М.: МИФИ, 2007. С. 177-178.
 36. Петров А.Г., Киргизова А.В. Исследование влияния предварительно накопленной дозы на уровень сохранности информации КМОП КНС БИС ОЗУ при импульсном ионизирующем воздействии // Научная сессия МИФИ-2007. Сб. научн. трудов. Т. 1 – М.: МИФИ, 2007. С. 185-186.

Список сокращений

АПИК – аппаратно-программный испытательный комплекс;
АФТ – алгоритмический функциональный код;
БИС – большая интегральная схема;
ЗУ – запоминающее устройство;
ИИВ – импульсное ионизирующее воздействие;
ИС – интегральная схема;
КМОП – комплементарные МОП;
МОП – металл - окисел – полупроводник;
МОПТ – МОП-транзистор;
КНИ – кремний на изоляторе;
КНС – кремний на сапфире;
ЛИ – лазерное излучение;
МУ – моделирующая установка;
НИР – научно-исследовательская работа;
ОКР – опытно-конструкторская работа;
ОЗУ – оперативное запоминающее устройство;
ПЗУ – постоянное запоминающее устройство;
РКТ – ракетно-космическая техника;
СБИС – сверхбольшая интегральная схема;
СУ – система управления;
УБР – уровень безсбойной работы;
УСИ – уровень сохранности информации.
ЯП – ячейка памяти.

pМОПТ – МОП-транзистор с p-каналом;
nМОПТ – МОП-транзистор с n-каналом;
SOSR – SOSResponse.