

На правах рукописи

Экз. №

ЯНЕНКО АНДРЕЙ ВИКТОРОВИЧ

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ
РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В ИНТЕГРАЛЬНЫХ
ОПЕРАТИВНЫХ ЗАПОМИНАЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛОКАЛЬНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

05.13.05 - Элементы и устройства вычислительной техники
и систем управления

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:



Москва – 2009 г.

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

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Чумаков Александр Иннокентьевич

Официальные оппоненты: Доктор технических наук
Данилин Николай Семенович

Кандидат технических наук
Безбородов Валерий Никифорович

Ведущая организация: ФГУП «НИИП»

Защита состоится 20 апреля 2009 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 марта 2009 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре, за-
веренный печатью организации.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор



П.К. Скоробогатов

Общая характеристика работы

Диссертация направлена на решение важной научно-технической задачи по развитию методов и средств исследования радиационных эффектов в интегральных схемах (ИС) оперативных запоминающих устройств (ОЗУ) с использованием локального воздействия, имеющей существенное значение для оценки, прогнозирования и обеспечения радиационной стойкости БИС ОЗУ, что необходимо для построения высоконадежных электронных устройств систем управления военного, космического и другого специального назначения, улучшения их функциональных и эксплуатационных характеристик.

Актуальность темы диссертации

Интегральные оперативные запоминающие устройства являются базовыми функциональными узлами современных систем сбора и обработки данных и систем управления специального назначения, эксплуатируемых в условиях радиационных воздействий. При этом ОЗУ являются одними из наиболее уязвимых элементов современных электронных систем при воздействии ионизирующего излучения (ИИ) и высокоэнергетичных ядерных частиц (ОЯЧ) вследствие реализации в них максимальной степени интеграции и сравнительно небольших уровней внутренних электрических помех для переключения отдельных ячеек памяти.

Повышение требований к тактико-техническим характеристикам современных специальных систем управления требует применения БИС ОЗУ, с одной стороны, большой информационной емкости, а с другой стороны - с повышенной радиационной стойкостью. Повышение информационной емкости за счет уменьшения размеров ячеек памяти с переходом на субмикронные технологические нормы проектирования приводит к возрастанию роли паразитных структур, что проявляется в существенном усложнении характера радиационного поведения БИС ОЗУ и уменьшению энергии, необходимой для переключения ячейки памяти, то есть потенциально повышается чувствительность к радиационным воздействиям по сравнению с ИС малой степени интеграции.

В условиях недостаточного развития российской микроэлектронной промышленности и отсутствия отечественных БИС ОЗУ большой информационной емкости сложилась практика частичного комплектования узлов систем управления БИС ОЗУ иностранного производства, для которых требуется подтверждение их радиационной стойкости.

С учетом низких объемов отечественного микроэлектронного производства, его неритмичности и прерывистости, применения изделий иностранного производства, требуется поиск новых решений в области повышения стабильности и качества технологических процессов, разработки и внедрения новых высоко эффективных методов оценки, прогнозирования, обеспечения и контроля радиационной стойкости ОЗУ на всех этапах жизненного цикла изделий. Развитие отечественной электронной компонентной базы и обеспечение ее радиационной стойкости является приоритетной государственной задачей в соот-

ветствии с «Основами политики Российской Федерации в области развития электронной компонентной базы на период до 2010 года и дальнейшую перспективу», утвержденных Президентом Российской Федерации 12.04.2002.

Перечисленные выше факторы обуславливают необходимость развития существующих и разработки новых методов и средств исследования радиационной стойкости БИС ОЗУ.

Состояние исследований по проблеме

Вопросам моделирования, оценки и прогнозирования радиационной стойкости БИС ОЗУ посвящены многочисленные работы к.ф.-м.н. Полякова И.В. (ОАО «НПП «Сапфир»), Калинина А.В., к.т.н. Машевича П.Р., Романова А.А. (ОАО «Ангстрем»), к.т.н. Герасимова Ю.М., к.т.н. Григорьева Н.Г. (МИФИ) и других специалистов. В трудах д.т.н. Петросянца К.О. и к.т.н. Харитоновой И.А. (МИЭМ) были разработаны методы электрического моделирования и предложены SPICE-модели сбоев отдельных ячеек памяти.

Отдельные решения по развитию методических и технических средств контроля параметров БИС ОЗУ в процессе радиационного эксперимента на моделирующих установках (МУ) предложены к.т.н. Калашниковым О.А. (МИФИ), к.т.н. Фигуровым В.С. и Емельяновым В.В. (ФГУП «НИИП»). Глубокий функциональный контроль микросхем памяти сравнительно большой информационной емкости, в том числе, по критерию сохранности информации при испытаниях на МУ, как правило, не проводился, так как это было сопряжено с техническими трудностями дистанционного контроля в процессе облучения. Поэтому показатели радиационной стойкости БИС ОЗУ, определенные по результатам традиционных радиационных испытаний на МУ, характеризовались недостаточно высокой информативностью.

Имитационные методы радиационных испытаний (физические модели полупроводниковых элементов, методики и первые результаты имитационных испытаний) интегральных микросхем были развиты в работах д.т.н. Скоробогатова П.К., д.т.н. Никифорова А.Ю., д.т.н. Чумакова А.И., к.т.н. Барбашова В.М., к.т.н. Калашникова О.А., к.т.н. Согояна А.В. (МИФИ), что обеспечило повышение объема испытаний, увеличения информативности функционального и параметрического контроля интегральных микросхем по сравнению с испытаниями на моделирующих установках. В работах Киргизовой А.В. (МИФИ) были развиты методические и технические средства и проведено исследование радиационного поведения специальных радиационно-стойких КМОП КНС ОЗУ в зависимости от режима работы и влияния записанного информационного кода на уровень сохранности информации с целью повышения сбоеустойчивости этого класса ИС при воздействии импульсного ионизирующего излучения.

Обеспечение радиационной стойкости БИС ОЗУ на этапе проектирования и производства традиционно осуществлялось расчетно-экспериментальными методами на основе

знаний о радиационном поведении отдельных элементов, без учета паразитных связей между ними, что было оправдано при невысокой степени интеграции разрабатываемых ИС памяти.

С повышением степени интеграции БИС ОЗУ и увеличением их информационной емкости применение выработанных методов прогнозирования и обеспечения их радиационной стойкости, методических и технических средств имитационных испытаний ограничивается следующими основными факторами:

- повышается ресурсоемкость прямых расчетных методов вследствие увеличения числа элементов в БИС;

- возрастает роль паразитных структур, параметры которых не контролируются в процессе производства, что проявляется в существенном усложнении характера радиационного поведения БИС ОЗУ (влиянии на стойкость режима работы, информационного кода, условий применения);

- возрастающая плотность металлизации ограничивает применимость лазерных имитационных методов для исследования чувствительности БИС ОЗУ к воздействию отдельных ядерных частиц;

- усиливается роль эффектов, обусловленных совокупной реакцией отдельных элементов (например, эффект «просадки» питания при импульсном ИИ). Вследствие этого затрудняется анализ радиационного поведения отдельных функциональных блоков БИС ОЗУ и его влияния на уровень радиационной стойкости БИС в целом;

- повышается ресурсоемкость контроля параметров БИС ОЗУ; резкое увеличение продолжительности полного функционального контроля делает невозможным использование в ходе радиационных испытаний сложных алгоритмов типа N^2 и $N^{3/2}$ для выявления радиационно-чувствительных функциональных блоков БИС ОЗУ.

Таким образом, к началу диссертационной работы методики и средства идентификации наиболее чувствительных элементов и функциональных блоков, определяющих уровни отказов и сбоев БИС ОЗУ по доминирующим радиационным эффектам с учетом проявления интегральных эффектов по всему кристаллу при импульсном, стационарном ИИ и воздействии отдельных ядерных частиц были проработаны недостаточно, что является заметным препятствием на пути выработки рекомендаций по повышению их радиационной стойкости. Имеющиеся на момент начала работы аппаратно-программные средства эксперимента не обеспечивали возможности полноценного автоматизированного управления (в том числе и дистанционного для применения на моделирующих установках), функционального контроля и диагностирования элементов и функциональных блоков БИС ОЗУ в процессе исследований на стойкость к доминирующим радиационным эффектам (объемным ионизационным, поверхностным радиационным и эффектам от отдельных ядерных частиц).

Целью диссертации является повышение эффективности существующих и разработка новых научно обоснованных методических и технических средств оценки показателей радиационной стойкости элементов и функциональных узлов БИС ОЗУ с помощью локального радиационного воздействия.

Под локальным радиационным воздействием подразумевается фрагментарное облучение отдельных функциональных блоков и элементов БИС ОЗУ, при этом размер области воздействия ограничивается сверху отсутствием влияния интегральной ионизационной реакции микросхемы на исследуемые радиационные эффекты.

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

- разработка и апробирование метода исследования БИС ОЗУ на основе импульсного расфокусированного (локального) лазерного излучения;
- анализ возможности использования локального лазерного излучения для определения чувствительных элементов и фрагментов БИС по эффектам объемной ионизации;
- анализ и разработка модели эффекта «просадки» питания в БИС ОЗУ при импульсном ионизирующем воздействии;
- разработка и апробирование метода локального облучения БИС ОЗУ рентгеновским излучением; анализ и моделирование эффекта релаксации («отжига») функциональных отказов ячеек памяти БИС ОЗУ, вызванных дозовыми эффектами;
- разработка аппаратно-программных средств для проведения экспериментальных радиационных исследований БИС ОЗУ с помощью методик локального радиационного воздействия (средства воздействия, контроля параметров и алгоритмы функционального контроля БИС ОЗУ).

Научная новизна работы:

1. Предложен и апробирован метод локального воздействия импульсным лазерным излучением, позволяющий выявлять наиболее радиационно-чувствительные фрагменты и функциональные блоки БИС ОЗУ по эффектам объемной ионизации;
2. Разработана базовая методика определения параметров чувствительности элементов и фрагментов БИС ОЗУ по эффектам объемной ионизации на основе предложенного метода локального лазерного облучения, позволяющая исключить влияния эффекта «просадки» питания на параметры чувствительности;
3. Разработана модель интегрированной ионизационной реакции в цепи питания БИС ОЗУ при импульсном ионизирующем воздействии, учитывающая эффект «просадки» питания, которая позволяет прогнозировать уровни функциональных сбоев БИС ОЗУ по результатам исследования ионизационной реакции тока потребления;
4. Разработан и апробирован специализированный алгоритм функционального контроля (ФК) БИС ОЗУ на основе псевдослучайного кода, повышающий эффективность ФК при исследованиях функциональных отказов и сбоев при импульсном, стационарном ио-

низирующем воздействии и воздействии отдельных ядерных частиц;

5. Предложен и апробирован метод локального облучения рентгеновским излучением для определения наиболее радиационно-чувствительных элементов и функциональных блоков БИС ОЗУ и оценки их радиационной стойкости по поверхностным радиационным эффектам.

Практическая значимость работы:

1. Разработаны методики и аппаратно-программные средства для исследований БИС ОЗУ различной организации и их функциональных блоков на стойкость к доминирующим радиационным эффектам (объемной и поверхностной ионизации, эффектам от отдельных ядерных частиц) на моделирующих и имитирующих установках с использованием локального воздействия. Разработанные методические и технические средства обеспечивают диагностирование функциональных и параметрических отказов БИС ОЗУ непосредственно в процессе и после ионизирующего воздействия и внедрены в ОАО «ЭНПО СПЭЛС» при проведении испытаний БИС ОЗУ на МУ и имитаторах.

2. Разработана и апробирована расчетно-экспериментальная методика прогнозирования уровня функциональных отказов в БИС ОЗУ при низкой интенсивности по результатам ускоренных испытаний при высокой интенсивности стационарного ИИ на основе метода облучение-релаксация;

3. Разработан при участии автора имитационный стенд «Радон-9Ф» на основе сфокусированного лазерного излучения наносекундной длительности, который используется в ОАО «ЭНПО СПЭЛС» при проведении испытаний на чувствительность БИС ОЗУ к тиристорным эффектам от воздействия отдельных ядерных частиц.

3. Впервые в России проведены испытания БИС ОЗУ на ускорителях протонов и имитирующих установках на стойкость к воздействию отдельных ядерных частиц. С помощью разработанных автором средств выявлены причины отказа аппаратуры БВС-14М828 из состава изделия 14Ф137.

4. Полученные в диссертации результаты реализованы в нормативных документах, развивающих положения КГВС «Климат-7», в том числе, в РД В 319.03.22 – 97, РД В 319.03.24 – 97, РД В 319.03.38-2000, РД В 2002.12, РД В 319.03.52-2004, ОСТ В 11 073.013 (ч.10) «Микросхемы интегральные. Методы испытаний на специальную стойкость и импульсную электрическую прочность».

5. Результаты диссертационной работы были использованы при написании учебного пособия МИФИ «Радиационные эффекты в БИС ОЗУ при воздействии импульсного ионизирующего излучения на моделирующей установке АРСА: Лабораторная работа»;

6. Результаты диссертации вошли в отчетные материалы по НИР и составным частям ОКР («Кашира», «Андромеда», «Хурал», «Колун», «Апликация», «Мурена», «Абонемент»,

«Маломерка», «Сверло С2», «Литературовед», «Лицей» и др.), выполняемых по заказам Минобороны РФ, Росатома и предприятий оборонного комплекса.

7. Проведены испытания более 30 типов БИС ОЗУ различной организации отечественного и иностранного производства, в том числе КМОП БИС ОЗУ 1637РУ13, 537РУ30, 530РУ2ММ, 1637РУ1У, 537РУ6, 1637РУ1У, 1635РУ1, 1645РУ1У и других. По результатам испытаний оформлено более 35 протоколов испытаний, результаты испытаний внедрены в ОАО «Ангстрем», ОАО «НИИМЭ и Микрон», ПМК «Миландр» и ОАО «ЭНПО СПЭЛС».

Результаты, выносимые на защиту:

1. Метод исследования БИС ОЗУ на основе импульсного локального (расфокусированного) лазерного излучения, который позволяет выявлять функциональные блоки и элементы, определяющие радиационную стойкость БИС ОЗУ, и оценить предельно достижимые уровни стойкости.

2. Модель интегральной ионизационной реакции тока потребления БИС ОЗУ при импульсном ионизирующем воздействии, которая позволяет учесть эффект «просадки» питания и прогнозировать уровень сохранности информации в БИС ОЗУ при воздействии импульсного ИИ с заданными амплитудно-временными характеристиками по результатам исследования ионизационной реакции в цепи питания микросхемы.

3. Базовая методика поиска областей чувствительности БИС ОЗУ к тиристорным эффектам и определения параметров чувствительности элементов и фрагментов БИС ОЗУ по эффектам объемной ионизации, исключая влияние эффекта «просадки» питания, с использованием локального лазерного излучения.

4. Метод локального воздействия рентгеновским излучением на БИС ОЗУ, который позволяет определять наиболее радиационно-чувствительные к поверхностным радиационным эффектам функциональные блоки БИС ОЗУ.

5. Расчетно-экспериментальная методика прогнозирования уровня функциональных отказов БИС ОЗУ при низкой интенсивности ИИ по экспериментальным данным набора и релаксации функциональных отказов в блоке ячеек памяти при высокой интенсивности излучения.

6. Специализированный алгоритм функционального контроля БИС ОЗУ с использованием псевдослучайного кода, более эффективно выявляющий радиационные отказы в функциональных блоках БИС ОЗУ без увеличения времени выполнения теста и позволяющий в несколько раз повысить эффективность использования времени облучения на моделирующей установке при исследовании локальных радиационных эффектов.

7. Результаты экспериментальных исследований радиационного поведения и испытаний основных типов отечественных КМОП БИС ОЗУ по объемным и дозовым эффектам, а также по эффектам от отдельных ядерных частиц, подтверждающие обоснованность пред-

ложенных методических и технических средств моделирования и прогнозирования радиационного поведения БИС ОЗУ.

8. Специализированные и адаптированные аппаратно-программные средства проведения функционального и электрического контроля БИС ОЗУ в ходе радиационных испытаний на моделирующих и имитирующих установках.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на Российских научных конференциях, в том числе “Радиационная стойкость электронных систем” (г. Лыткарино, 2002-2008 гг.); “Электроника, микро– и нанoeлектроника” (г. Кострома 2003 г., г. Вологда 2005 г., г. Гатчина 2006 г.), на научных сессиях МИФИ (г. Москва, 1999-2008 гг.); на зарубежных конференциях: XVII Международный Симпозиум по ядерной электронике JINES-97 (г. Варна, 15-21 сент., 1997), «Radiation and its Effects on Components and Systems» (RADECS) (Греция, 2006 г.), 9th Workshop on Electronics for LHC Experiments (Нидерланды, 2003 г.), Nuclear and Space Radiation Effects Conference (NSREC) (США, 1996, 1997).

Публикации: Основные результаты диссертации опубликованы в более чем 35 работах, в том числе в 13 (в период с 2003 по 2008 гг.), 8 без соавторов, 2 в реферируемых изданиях, рекомендованных ВАК.

Объем и структура диссертации. Диссертация содержит 146 страниц, в том числе 68 рисунков, 18 таблиц, список литературы из 108 наименований и состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Содержание диссертации

Глава 1. Проблемы оценки радиационной стойкости БИС ОЗУ

Проведенный автором анализ показал, что в значительной степени радиационная стойкость устройств вычислительной техники и систем управления определяется радиационной стойкостью БИС ОЗУ. Из известных радиационных эффектов в интегральных микросхемах и особенностей их проявления в БИС ОЗУ следует, что доминирующими для БИС ОЗУ являются поверхностные радиационные и объемные ионизационные эффекты, а также эффекты от воздействия отдельных ядерных частиц.

Анализ проблемной ситуации в области оценки и прогнозирования радиационной стойкости БИС ОЗУ при воздействии ионизирующих излучений показал следующее.

Развитые методы радиационных исследований БИС ОЗУ подразумевают воздействие ионизирующего излучения моделирующих установок и имитаторов на БИС в целом, при этом затруднено получение информации о радиационном поведении отдельных функциональных блоков БИС ОЗУ и прослеживается существенное влияние интегральной ионизационной реакции (в частности – «просадка» питания на внутренних шинах при импульсном ионизирующем воздействии) на условия функционирования узлов БИС ОЗУ.

Во многих случаях радиационная стойкость БИС ОЗУ определяется не отказами и сбоями собственно элементов БИС, а паразитными структурами, роль которых практически не проявляется при нормальных условиях эксплуатации. Электрофизические параметры паразитных структур не контролируются в процессе производства, таким образом, применение расчетного моделирования для прогнозирования радиационной стойкости БИС ОЗУ представляется трудно разрешимой задачей.

Применяемые алгоритмические функциональные тесты для поиска и идентификации неисправностей в БИС ОЗУ оказываются неэффективными при проведении радиационных испытаний: они либо основаны на применении гладких и регулярных кодов (например, «поле 0», «шахматный»), недостаточно эффективно выявляющих ряд функциональных отказов, либо применяют сложные алгоритмы длительностью N^2 или $N^{3/2}$, не подходящие для функционального контроля во время ускоренных радиационных испытаний из-за резкого увеличения продолжительности их выполнения для современных БИС ОЗУ большого объема.

Таким образом, требуется развитие имеющихся и разработка новых методических и технических средств исследования радиационной стойкости современных БИС ОЗУ, направленных на повышение информативности о радиационном поведении не только БИС ОЗУ в целом, но и ее отдельных функциональных блоков, которые обеспечат возможность оценки, прогнозирования, обеспечения и контроля радиационной стойкости на всех этапах жизненного цикла изделий. Для этого автором предлагается использовать локальное (фрагментарное) радиационное воздействие на функциональные блоки БИС ОЗУ.

На основании вышеизложенного автором сформулированы цель и задачи диссертации.

Глава 2. Методы и средства локального радиационного воздействия на БИС ОЗУ по эффектам объемной ионизации

В главе 2 кратко рассмотрены разработанные при участии автора технические средства и методические особенности имитационных радиационных испытаний БИС ОЗУ на стойкость к воздействию импульсного ионизирующего излучения по объемным ионизационным эффектам, которые позволяют испытывать современные БИС ОЗУ с организацией 256Кх16 (4Мбит) в диапазоне напряжений питания от 3,0 до 7,5В при эквивалентных уровнях воздействия до 10^{12} ед./с.

Анализ накопленного объема экспериментальных данных, полученных автором при исследовании объемных ионизационных эффектов в более чем 30 типов БИС ОЗУ различной организации отечественного и иностранного производства показывает, что при воздействии импульсного ионизирующего излучения основными радиационными эффектами в БИС ОЗУ являются: функциональные сбои, переходные процессы на выходных сигналах,

импульсная реакция тока потребления, тиристорный эффект; проиллюстрированы проявления этих радиационных эффектов.

На основе систематизации и анализа полученных экспериментальных данных установлено, что зависимость амплитуды импульсной реакции тока потребления при импульсном ионизирующем воздействии имеет перегиб при уровне воздействия, соответствующем уровню функциональных сбоев (уровень сохранности информации). Это позволяет предположить, что при определенных уровнях воздействия в БИС ОЗУ возникают условия, ограничивающие линейное нарастание ионизационной реакции по току потребления и приводящие к потере информации в ячейках памяти. Причиной такого поведения может быть парафазные импульсные помехи на внутренних шинах из-за протекания импульсного фототока, в первую очередь, паразитных р-п переходов, например карман-подложка. Очевидно, что величина импульса внутренней ионизационной реакции не будет постоянной для всех структур из-за распределенного характера омического сопротивления шин питания и будет уменьшаться при приближении к выводам питания БИС ОЗУ. В этом случае следует ожидать, что первые функциональные сбои при плавном увеличении уровня воздействия будут наблюдаться в определенных ячейках памяти, для которых создаются наихудшие условия («просадка» внутреннего питания максимальна). Для исследования этих предположений автором было доработано программное обеспечение испытательного комплекса и проведено исследование нескольких типов БИС ОЗУ. В результате впервые было экспериментально установлено, что в БИС ОЗУ имеет место корреляция адресов ячеек, в которых наблюдаются первые функциональные сбои, с уровнем воздействия. Эта корреляция проявляется в однотипных образцах БИС ОЗУ как появление первых функциональных сбоев в одних и тех же логических адресах и постепенное увеличение области логических адресов функциональных сбоев по мере увеличения уровня воздействия, что говорит в пользу взаимосвязи функционального сбоя в ячейке с «просадкой» внутреннего напряжения питания.

Выявленные таким образом закономерности легли в основу предлагаемой модели зависимости тока потребления БИС ОЗУ от мощности дозы (рис. 1), учитывающей собственное сопротивление (R_1) и емкость (C_1) БИС, а также сопротивление и емкость измерительных приборов (R_2 , C_2). В линейном приближении для зависимости амплитуды генератора ионизационного тока от приложенного к нему напряжения U_z предлагается использовать выражение

$$I_u = \frac{I_{uo}}{1 + k_u \cdot \left(\frac{I_{uo} \cdot R_1}{U_{cc} + \varphi_d} \right)^\alpha}, \quad (1)$$

где I_{uo} – величина ионизационного тока в отсутствие зависимости от приложенного напряжения, k_u , α – коэффициенты аппроксимации, учитывающие влияния напряжения (для

большинства случаев можно считать $k_u \geq 1$, а показатель степени равен $\alpha \approx 1 \dots 0.5$), φ_d - напряжение холостого хода эффективного диода, который определяет величину ионизационного тока I_{uo} (типичная величина $\varphi_d \approx 0.5 \dots 0.6$ В). Тогда уровень мощности дозы, при котором наступает функциональный сбой, будет взаимосвязан с параметрами эквивалентной схемы, влияющими на просадку питания, следующим образом:

$$P_U \approx \frac{U_{cc}}{k_{cc} \cdot R_1} \cdot \frac{1}{K_i \cdot (1 + k_u / k_{cc})}, \quad (2)$$

где P_U - уровень функционального сбоя БИС ОЗУ, K_i - коэффициент пропорциональности между мощностью дозы ИИ и амплитудой ионизационного тока ($I_{uo} = K_i P$), при этом условие наступления функционального сбоя БИС ОЗУ имеет место при уменьшении питания в k_{cc} раз с типовым значением около 2. Апробация модели на БИС ОЗУ 537РУ6 показала удовлетворительное согласование экспериментальных и расчетных данных (рис. 2).

Выявленное влияние просадки внутреннего питания при импульсном ионизирующем воздействии на режимы работы функциональных блоков и элементов БИС ОЗУ не позволяют использовать интегральное однородное воздействие для исследования их радиационного поведения. Для снижения влияния эффекта «просадки» питания автором предложен метод локального (фрагментарного) воздействия на кристалл БИС ОЗУ излучением лазерного имитатора, при котором облучается не весь кристалл целиком, а только его часть. Очевидно, что в этом случае «просадка» питания должна уменьшиться из-за уменьшения величины общего фототока.

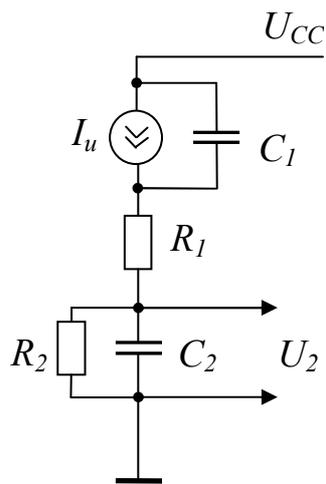


Рис. 1. Эквивалентная схема для анализа эффекта просадки питания в ИС

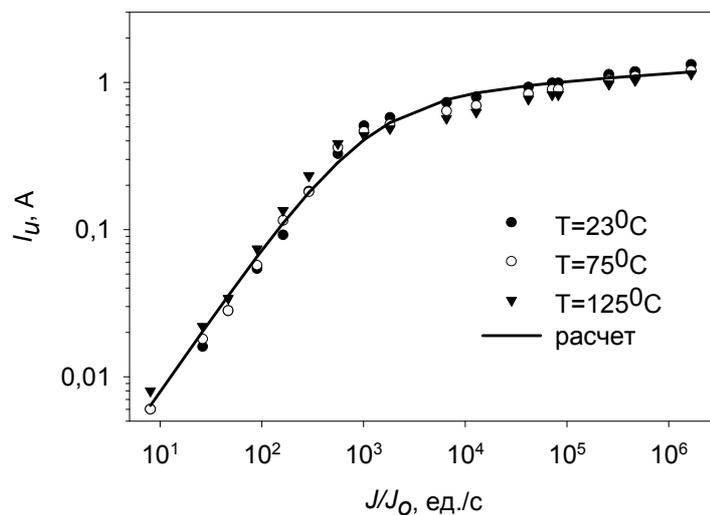


Рис. 2. Экспериментальные и расчетные зависимости ионизационной реакции КМОП ОЗУ емкостью 4 кбит от нормированной энергии импульса лазерного излучения

Формирование области локального воздействия предлагается осуществлять с помощью установки, формирующей сфокусированное лазерное импульсное излучение, путем введения «расфокусировки» (смещения поверхности кристалла из плоскости острой фокусировки). В этом случае диаметр области локального воздействия зависит от расстояния плоскости поверхности кристалла БИС до плоскости фокусировки с учетом эффективного угла расходимости пучка для используемого микрообъектива.

Метод локального лазерного воздействия был апробирован на нескольких типах БИС ОЗУ. В результате была подтверждена существенная роль эффектов «просадки» питания в формировании функциональных сбоев и тиристорного эффекта. Экспериментально показано, что при переходе от воздействия на весь кристалл БИС ОЗУ к локальному воздействию на часть кристалла эквивалентные уровни функциональных сбоев в ячейках БИС ОЗУ возрастают (рис. 3,а), а для тиристорного эффекта – уменьшаются (рис. 3,б).

При этом в области диаметров пятна излучения от 100 до 300 мкм пороговая плотность энергии лазерного излучения для эффекта сбоев, которая прямо пропорциональна эквивалентной мощности дозы ионизирующего излучения, остается постоянной (для тиристорного эффекта изменение пороговой плотности энергии обусловлено протяженностью чувствительной структуры, как будет показано в главе 4), что говорит о применимости локального импульсного ионизирующего излучения лазерного имитатора для оценки параметров радиационной стойкости (уровень сохранности информации, уровень тиристорного эффекта и т.д.) отдельных элементов и функциональных блоков БИС ОЗУ, при этом исключается сильное влияние эффекта «просадки» питания на процессы формирования и развития радиационных эффектов в них.

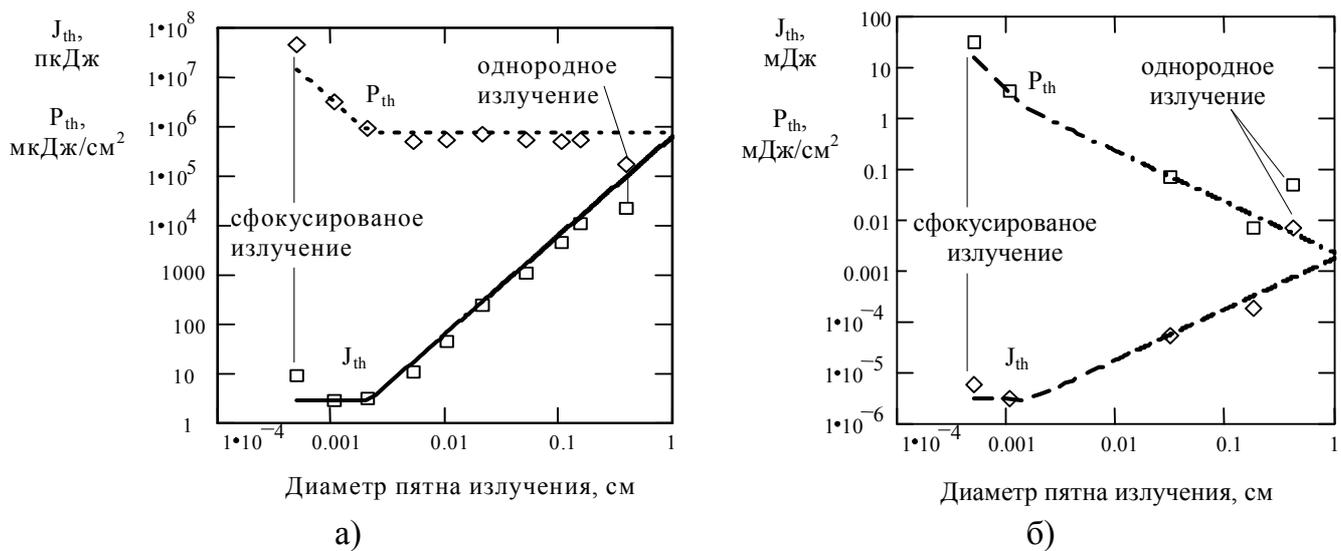


Рис. 3. Результаты эксперимента (точки) и расчета (линии) пороговых энергии (J_{th}) и плотности энергии (P_{th}) для эффекта сбоев в ИС ОЗУ 541РУ1 (а) и тиристорного эффекта в БИС ОЗУ 537РУ6 (б)

Глава 3. Исследование возможностей средств локального воздействия на БИС ОЗУ по поверхностным радиационным эффектам

В главе 3 кратко рассмотрены разработанные при участии автора технические средства и методические особенности имитационных радиационных испытаний БИС ОЗУ на стойкость к воздействию стационарного ионизирующего излучения по поверхностным радиационным эффектам, которые позволяют испытывать современные БИС ОЗУ с организацией 256Кх16 (4Мбит) в диапазоне напряжений питания от 3,0 до 7,5В.

Анализ экспериментальных данных, полученных автором при исследовании поверхностных радиационных эффектов в более чем 30 типов БИС ОЗУ различной организации отечественного и иностранного производства, показывает, что при воздействии стационарного ионизирующего излучения основными радиационными эффектами в БИС ОЗУ являются: деградация (увеличение) тока потребления, функциональные отказы, в некоторых случаях – деградация времени выборки. Прослеживается зависимость радиационного поведения БИС ОЗУ от режима работы: в некоторых типах БИС ОЗУ имеет место зависимость уровней функциональных отказов ячеек памяти от адресов и разрядов данных; наблюдается влияние записанного в ОЗУ тестового кода на радиационную деградацию тока потребления, уровень функционального отказа. Таким образом, полученные данные говорят о неоднозначности радиационного поведения функциональных блоков и позволяют заключить, что при использовании традиционных методов исследований (с применением интегрального воздействия на весь кристалл БИС) выделение вклада каждого функционального блока в радиационное поведение БИС ОЗУ является трудноразрешимой задачей.

Для повышения информативности радиационных исследований автором предложен метод локального воздействия рентгеновским излучением, который позволяет эффективно определять наиболее радиационно-чувствительные по поверхностным радиационным эффектам функциональные блоки БИС ОЗУ. Возможности предлагаемого метода продемонстрированы на примере исследований КМОП БИС ОЗУ 537РУ6 (рис. 4).

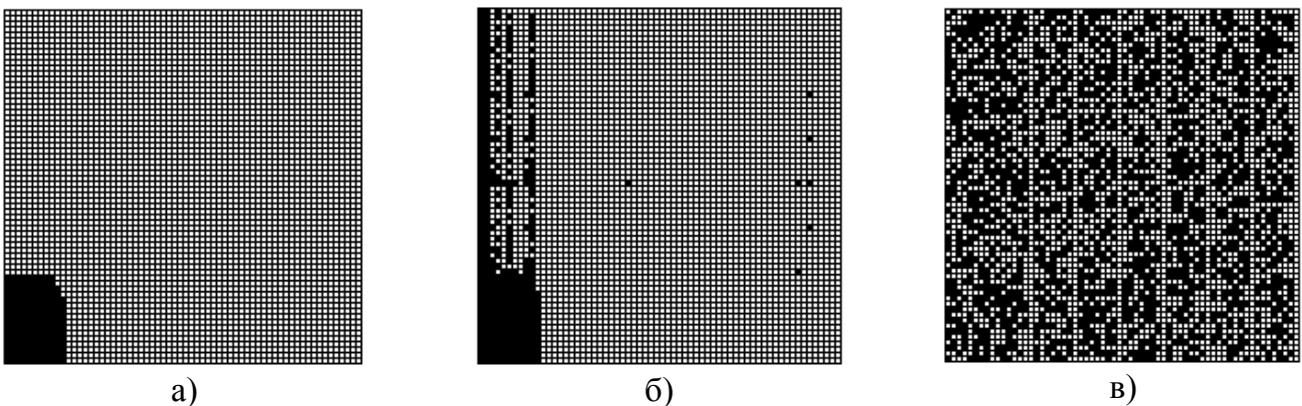


Рис. 4. БИС ОЗУ 537РУ6. Распределение отказов по адресному пространству (4Кх1) после локального облучения края кристалла (каждая клетка соответствует отдельной ячейке памяти): а) $D=1,4 \cdot 10^4$ ед., поле «1», отказ только облучаемых ячеек памяти; б) $D=2,3 \cdot 10^4$ ед., поле «1», дополнительный отказ усилителей записи-считывания; в) $D=2,8 \cdot 10^4$ ед., «псевдо-случайный код», дополнительные отказы дешифраторов

На основе проведенного расчетного моделирования с помощью системы GEANT 4 в рамках системы моделей PENELOPE разработаны рекомендации по выбору материала и толщины для металлической маски (свинцовая фольга толщиной 0,1...0,2мм), формирующей форму области локального рентгеновского излучения, с учетом спектра рентгеновского излучения имитатора.

Следует отметить, что применяемые в практике радиационных испытаний гладкие и регулярные тестовые коды («поле 0», «поле 1», «шахматный») для тестов типа «запись-считывание» не способны выявлять отказы во всех функциональных блоках БИС ОЗУ. Для повышения эффективности таких функциональных тестов предложено и обосновано использование псевдослучайной последовательности данных в качестве информационного поля (кода). Сравнение эффективности тестов на основе псевдослучайного кода с использованием разработанной программной модели БИС памяти показали, что тест «запись-считывание псевдослучайного кода» позволяет определять функциональные отказы дешифратора адреса и большинство отказов накопителя. При той же длине теста $4N/D$ (где N – число ячеек в ОЗУ, D – разрядность слова данных) «запись-считывание псевдослучайного кода» является эффективнее тестов «запись-считывание гладкого кода» и «шахматный код». Тест «диагональ» имеет большую длину, при этом требует информации о распределении логических адресов по накопителю, которая, как правило, недоступна. Более «глубокие» тесты длиной $N^{3/2}$ и N^2 в условиях радиационных испытаний оказываются неприемлемы из-за слишком большой продолжительности по времени. Применение теста «запись-считывание псевдослучайного кода» в ходе радиационных испытаний показало его высокую эффективность также в выявлении обрывов сигнальных линий при подключении тестируемой памяти к блоку функционального контроля.

Впервые проведено экспериментальное исследование релаксации («отжига») функциональных отказов в БИС ОЗУ после стационарного и импульсного ионизирующего воздействия. Показано, что если установлена корреляция зависимостей дозовой деградации характеристик МОПТ и числа функциональных отказов КМОП БИС ОЗУ (рис.5), то возможно использовать однопараметрическую модель для прогнозирования функциональных отказов БИС ОЗУ при низкой интенсивности по результатам исследования набора и релаксации функциональных отказов при высокой интенсивности ионизирующего излучения:

$$F(x) = \left\{ \begin{array}{l} 0,5 + \exp(-W_b \cdot x^{W_a}) \text{ для } x \geq 0 \\ 0,5 + \exp(-W_b \cdot |x|^{W_a}) \text{ для } x < 0 \end{array} \right\} \quad (3)$$

где W_b , W_a – параметры аппроксимации, которые могут быть определены из зависимости количества отказавших ячеек в процессе проведения функционального контроля при облучении ИС; $x = D_e(t) - D_o$; D_o - уровень суммарной поглощенной дозы ИИ, при которой отказывает около 50% элементов; $D_e(t)$ - величина эффективной суммарной дозы облучения, которая зависит как от мощности ИИ, так и от процессов релаксации поверхностных радиа-

ционных эффектов. Предложенная расчетно-экспериментальная методика была апробирована на КМОП БИС ОЗУ 537РУ6 (рис.6), полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с расчетными.

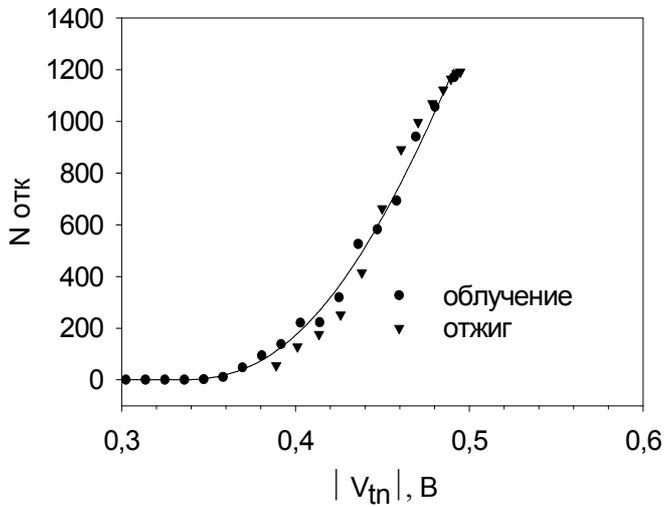


Рис. 5. Зависимости числа функциональных отказов при облучении и отжиге от сдвига порогового напряжения n-канального МОПТ КМОП ОЗУ 537РУ6

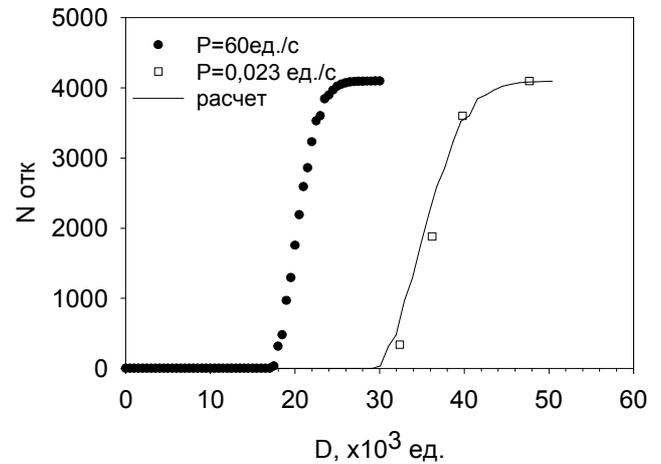


Рис. 6. Прогноз изменения числа функциональных отказов в КМОП ОЗУ 537РУ6 при облучении стационарного ИИ с разной интенсивностью

Глава 4. Исследования локальных радиационных эффектов в БИС ОЗУ

В главе 4 рассмотрены разработанные при участии автора аппаратные и методические средства для исследования локальных радиационных эффектов от отдельных ядерных частиц в БИС ОЗУ, которые позволяют проводить исследования современных БИС ОЗУ с использованием моделирующих установок и имитаторов на основе изотопных источников и сфокусированного лазерного излучения. Автором предложен и апробирован специализированный алгоритм функционального контроля БИС ОЗУ в процессе радиационных испытаний, который позволяет проводить в одном цикле проверку работоспособности ячеек памяти и регистрацию одиночных сбоях, что позволяет в несколько раз повысить эффективность использования времени облучения на моделирующей установке при исследовании одиночных эффектов. В основе алгоритма – применение чередования операций считывания, записи-считывания инверсного тестового кода, записи-считывания исходного тестового кода последовательно для каждого логического адреса и выявление информации об одиночных сбоях и функциональных отказах в разрядах слова данных по результатам трех считываний. При этом может применяться любой тестовый информационный код для исследования влияния записанной информации на чувствительность к локальным радиационным эффектам. Тест с использованием «псевдослучайного» кода применяется в начале алгоритма для выявления неисправности в БИС ОЗУ или системе функционального контроля, а также при обнаружении функциональных отказов в БИС ОЗУ при облучении.

Анализ экспериментальных данных, полученных автором при исследовании локальных радиационных эффектов в БИС ОЗУ, показывает, что при воздействии одиночных вы-

сокоэнергетических ядерных частиц в БИС ОЗУ основными радиационными эффектами являются одиночные сбои и тиристорный эффект (эффект «защелкивания»).

Для современных БИС ОЗУ большая плотность металлизации ограничивает использование сфокусированного импульсного лазерного излучения для исследования локальных радиационных эффектов. Автором предложен метод исследования локальных радиационных эффектов в БИС ОЗУ на основе импульсного расфокусированного (локального) лазерного излучения, при этом снижается влияние металлизации и в десятки раз увеличивается производительность сканирования кристалла при определении наиболее чувствительных областей.

Проведено численное моделирование ионизационной реакции в полупроводниковых структурах БИС ОЗУ при воздействии локального лазерного излучения различного диаметра для эффектов одиночных сбоев и тиристорного эффекта. Анализ результатов численного моделирования и согласующихся с ними экспериментальных данных исследований нескольких типов БИС ОЗУ и тестовых структур позволил сделать вывод (рис.7), что зависимость пороговой энергии лазерного излучения от диаметра пятна будет практически постоянной, если размеры лазерного пятна не превышают размеров чувствительной области, а при дальнейшем увеличении диаметра лазерного пятна изменение пороговой энергии излучения будет близко к квадратичной зависимости для эффектов одиночных сбоев и описываться линейной функцией для эффектов «защелкивания». Также показано, что наиболее чувствительная к воздействию одиночных ядерных частиц область паразитной тиристорной структуры расположена около границы n-кармана (рис.8).

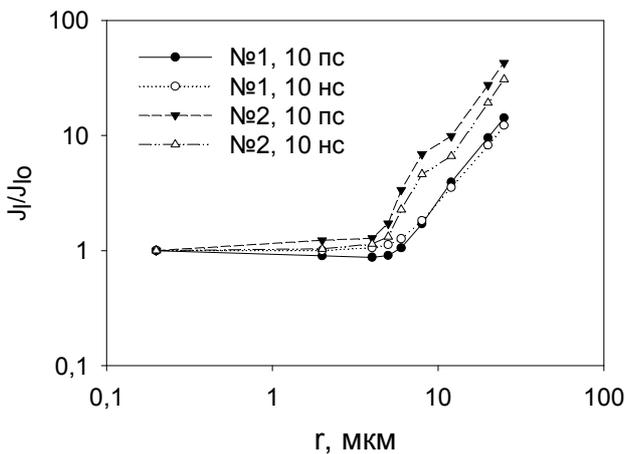


Рис. 7 – Зависимость нормированной пороговой энергии лазерного излучения от радиуса зоны облучения для моделируемых структур

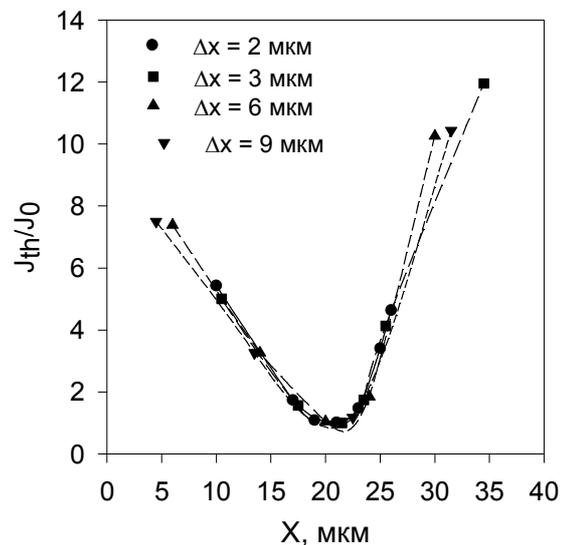


Рис. 8 – Зависимости нормированной пороговой энергии локального и сфокусированного лазерного излучения для возникновения тиристорного эффекта от координаты при различной ширине зоны облучения Δx . Координата 20 соответствует границе n-кармана

Это дало возможность предложить инженерные модели чувствительных областей для эффектов одиночных сбоя и «защелкиваний», с помощью которых удастся хорошо описать полученные экспериментальные результаты (рис.3):

$$LET_{seu} \approx k_l \cdot J_{ls} \cdot \sigma_{sseu} / \pi r^2, \quad (4)$$

$$LET_{sel} \approx k_l \cdot J_{ll} \cdot \sigma_{ssel} / ar, \quad (5)$$

где k_l – коэффициент перевода энергия лазерного излучения в ЛПЭ; J_{ls} , J_{ll} – пороговые энергии лазерного излучения для возникновения одиночного сбоя и эффекта защелкивания; r – радиус зоны локального облучения; σ_{sseu} , σ_{ssel} – сечения насыщения для одиночных сбоя и защелкивания; a – коэффициент пропорциональности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации заключаются в следующем:

1. Предложен и разработан метод локального облучения БИС ОЗУ на основе импульсного расфокусированного лазерного излучения, позволяющий выявлять наиболее радиационно-чувствительные фрагменты и функциональные блоки БИС ОЗУ по эффектам объемной ионизации. На основе предложенного метода разработана и апробирована базовая методика, которая позволяет исключить эффект «просадки» питания и в десятки раз повысить эффективность сканирования кристалла при поиске областей, чувствительных к сбоям и тиристорным эффектам.

2. Разработана и апробирована модель для описания интегральной ионизационной реакции в цепи питания БИС ОЗУ при импульсном ионизирующем воздействии, которая учитывает эффект «просадки» питания и позволяет прогнозировать уровень сохранности информации в БИС ОЗУ при воздействии импульсного ИИ по результатам исследования ионизационной реакции тока потребления. Проведен анализ и моделирование эффекта «просадки» питания в БИС ОЗУ при импульсном ионизирующем воздействии, в результате которого выявлено, что эффект «просадки» питания является доминирующим механизмом, приводящим к функциональным сбоям БИС ОЗУ. Показано, что из-за влияния эффекта «просадки» могут маскироваться тиристорные эффекты в БИС ОЗУ, поэтому использование интегрального импульсного ионизирующего воздействия для «отбраковки» БИС ОЗУ по чувствительности к тиристорному эффекту от отдельных ядерных частиц может приводить к неверным результатам. Установлено, что внешне эффект «просадки» питания в БИС ОЗУ проявляется через насыщение зависимости амплитуды импульсного тока потребления от уровня воздействия и локализацию области адресов ячеек памяти, для которых

3. Проведен анализ и расчетно-экспериментальное моделирование эффектов объемной ионизации при воздействии локального лазерного излучения на элементы БИС ОЗУ, в результате которого показана применимость локального лазерного излучения для опреде-

ления параметров чувствительности элементов и фрагментов БИС ОЗУ по эффектам объемной ионизации.

4. Предложен, разработан и апробирован метод локального воздействия рентгеновским излучением, который позволяет экспериментально определять уровни радиационной стойкости функциональных блоков БИС ОЗУ.

5. Предложен, разработан и апробирован специализированный алгоритм функционального контроля БИС ОЗУ на основе псевдослучайного кода для использования при исследованиях функциональных отказов и сбоев от отдельных ядерных частиц, а также при импульсном и стационарном ионизирующем воздействии, который обладает большей способностью выявления радиационных отказов в функциональных блоках БИС ОЗУ по сравнению с тестами, использующими гладкие и регулярные коды, без увеличения времени выполнения теста, позволяет в несколько раз повысить эффективность использования времени облучения на моделирующей установке при исследовании одиночных эффектов.

Основной практический результат диссертации заключается в разработке аппаратно-программных средств и методик для исследований БИС ОЗУ и их функциональных блоков на стойкость к доминирующим радиационным эффектам с использованием локального воздействия на имитирующих установках. Разработанные методические и технические средства обеспечивают диагностирование функциональных и параметрических отказов современных БИС ОЗУ непосредственно в процессе и после ионизирующего воздействия и внедрены в ОАО «ЭНПО СПЭЛС» при проведении испытаний БИС ОЗУ на моделирующих установках и имитаторах.

Частные практические результаты работы и их реализация:

1. При участии автора разработан имитационный стенд «Радон-9Ф» на основе сфокусированного лазерного излучения наносекундной длительности, который используется в ОАО «ЭНПО СПЭЛС» при проведении испытаний на чувствительность БИС ОЗУ к тиристорным эффектам от воздействия отдельных ядерных частиц.

2. Проведено экспериментальное исследование, анализ и моделирование эффекта релаксации («отжига») функциональных отказов ячеек памяти БИС ОЗУ, вызванных поверхностными ионизационными эффектами, в результате которого установлено, что в некоторых случаях число функциональных отказов БИС ОЗУ является функцией сдвига порогового напряжения МОП-транзистора. Разработана расчетно-экспериментальная методика прогнозирования функциональных отказов в БИС ОЗУ при низкой интенсивности по экспериментальным данным набора и релаксации функциональных отказов, полученным при относительно высокой интенсивности.

3. Проведены испытания более 30 типов БИС ОЗУ различной организации отечественного и иностранного производства, в том числе КМОП БИС ОЗУ 1637РУ13, 537РУ30, 530РУ2ММ, 1637РУ1У, 537РУ6, 1637РУ1У, 1635РУ1, 1645РУ1У и других. По результатам

испытаний оформлено более 35 протоколов испытаний, результаты испытаний внедрены в ОАО «Ангстрем», ОАО «НИИМЭ и Микрон», ПМК «Миландр» и ОАО «ЭНПО СПЭЛС». Впервые в России проведены испытания БИС ОЗУ на ускорителях протонов и имитирующих установках на стойкость к воздействию отдельных ядерных частиц. С помощью разработанных автором средств выявлены причины отказа аппаратуры БВС-14М828 из состава изделия 14Ф137.

4. Результаты диссертационной работы вошли в отчетные материалы по ряду НИР и составным частям ОКР («Кашира», «Андромеда», «Хурал», «Колун», «Апликация», «Мурена», «Абонемент», «Маломерка», «Сверло С2», «Литературовед», «Лицей» и др.), выполняемых по заказам Минобороны РФ, Росатома и предприятий оборонного комплекса, реализованы в нормативных документах, развивающих положения КГВС «Климат-7», в том числе, в РД В 319.03.22 – 97, РД В 319.03.24 – 97, РД В 319.03.38-2000, РД В 2002.12, РД В 319.03.52-2004, ОСТ В 11 073.013 (ч.10) «Микросхемы интегральные. Методы испытаний на специальную стойкость и импульсную электрическую прочность», были использованы при написании учебного пособия МИФИ.

Таким образом, в ходе работы над диссертацией достигнута ее основная цель, а именно повышена эффективность существующих и разработаны новые научно обоснованные методические и технические средства оценки показателей радиационной стойкости элементов и функциональных узлов БИС ОЗУ с помощью локального радиационного воздействия.

Основные работы, опубликованные по теме диссертации:

1. Методика оценки параметров чувствительности ИС к тиристорному эффекту при воздействии отдельных ядерных частиц / Чумаков А.И., Яненко А.В., Егоров А.Н., Маврицкий О.Б. и др. // Микроэлектроника.- 2008.- Т.37.- № 1.- С.45-51.
2. Яненко А.В. Средства функционального контроля для радиационных испытаний БИС ОЗУ // Научная сессия МИФИ-99.- Т.6. - М.: МИФИ, 1999.- С.146-147.
3. Яненко А.В. Функциональное тестирование БИС ОЗУ с произвольной выборкой с использованием псевдослучайного кода // Научная сессия МИФИ-2000.- Т.1. - М.: МИФИ, 2000.- С.125-126.
4. Яненко А.В. Устройство для исследования одиночных сбоев и защелкиваний в БИС запоминающих устройств на изотопных источниках // Наука на рубеже XXI века. Радиационные процессы в электронике. Сборник докладов.- М.:МИФИ, 1998.- С.119-125.
5. Яненко А.В. Техника испытаний БИС ОЗУ на чувствительность к одиночным сбоям при облучении протонами // Радиационная стойкость электронных систем. «Стойкость-98».- М. СПЭЛС-НИИП, 1998.- С.71-72.

6. Яненко А.В. Оценка порога защёлкивания КМОП ИС от отдельных заряженных ядерных частиц // Электроника, микро- и нанoeлектроника.- М.: МИФИ, 1999.- С.144-150.
7. Яненко А.В. Результаты исследования радиационной стойкости БИС ОЗУ с использованием локального воздействия// Радиационная стойкость электронных систем "Стойкость-2003". - М.: МИФИ, 2003.- С.41-42.
8. Specialized Simulation Test System for Microelectronic Devices Radiation Hardness Investigation and Failure Prediction/ Chumakov A.I., Yanenko A.V., Kalashnikov O.A, Nikiforov A.Y., et. al. // Proceedings of the 2nd Workshop on Electronics for LHC Experiments.- 1996.- Balatonfured, Hungary.- PP.428-432.
9. Базовая методика проведения экспериментальных исследований БИС на чувствительность к одиночным сбоям при протонном излучении/ Яненко А.В., Артамонов А.С., Демидов А.А., Чумаков А.И. - М.: Препринт/МИФИ, 1996.- 20с.
10. Chumakov A.I., Yanenko A.V. Radiation and Postirradiation Functional Upsets in a CMOS SRAM // IEEE Transactions on Nuclear Science.- 1996.- V.43.- №.6.- PP.3109-3114.
11. Лазерная установка для исследования сбоев и отказов в ИС, возникающих от отдельных ядерных частиц / Чумаков А.И., Егоров А.Н., Маврицкий О.Б., Яненко А.В.// Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость-2002». - М.: МИФИ, 2002.- С. 233-234.
12. Возможности использования локального лазерного излучения для моделирования эффектов от воздействия отдельных ядерных частиц в ИС/ Чумаков А.И., Егоров А.Н., Маврицкий О.Б., Яненко А.В.// Микроэлектроника.- 2004.- Т.33.- № 2.- С.28-123.
13. Яненко А.В., Егоров А.Н., Чумаков А.И. Корреляция адресов функциональных сбоев в БИС ОЗУ при импульсном ионизирующем воздействии // Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость-2008». - М.: МИФИ, 2008.- С.29-30.