

На правах рукописи

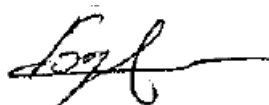
БОРУЗДИНА АННА БОРИСОВНА

**МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
МНОГОКРАТНЫХ СБОЕВ В КМОП МИКРОСХЕМАХ
СТАТИЧЕСКИХ ОПЕРАТИВНЫХ ЗАПОМИНАЮЩИХ УСТРОЙСТВ
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ОТДЕЛЬНЫХ ЯДЕРНЫХ ЧАСТИЦ**

05.13.05 - Элементы и устройства вычислительной техники
и систем управления

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:



Москва – 2014 г.

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ».

Научный руководитель Кандидат технических наук, доцент

Уланова Анастасия Владиславовна

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор,

зам. начальника НЦ ОАО «РКС»,

Данилин Николай Семенович

Кандидат технических наук,

начальник отдела ОАО «Корпорация «Комета»,

Соболев Сергей Анатольевич

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Научно-исследовательский
институт системных исследований
Российской академии наук (НИИСИ РАН)

Защита состоится 16 марта 2015 г. в 17 час. 00 мин.

На заседании диссертационного совета Д212.130.02

в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

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

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор



П.К. Скоробогатов

Общая характеристика работы

Диссертация направлена на решение актуальной научно-технической задачи разработки и внедрения методических и технических средств экспериментальных исследований эффектов многократных сбоев в микросхемах статических оперативных запоминающих устройств нового поколения при воздействии отдельных ядерных частиц (тяжелых заряженных частиц и высокоэнергетичных протонов), имеющей существенное значение для создания новых и совершенствования существующих элементов и устройств систем управления, вычислительной техники и целевой аппаратуры военного, космического и двойного назначения, повышения их функциональных и эксплуатационных характеристик, а также эффективности применения.

Актуальность темы диссертации

Современные микросхемы, изготовленные по субмикронным проектным нормам (менее 0,25 мкм), характеризуются высокой чувствительностью к одиночным радиационным эффектам (ОРЭ) от отдельных ядерных частиц (ОЯЧ). Для микросхем статических оперативных запоминающих устройств (СОЗУ) одним из характерных ОРЭ является эффект сбоев, приводящий к потере информации. Уменьшение проектных норм приводит к уменьшению площади логического элемента и расстояний между соседними логическими элементами, что повышает вероятность одновременного возникновения сбоев в нескольких ячейках памяти от воздействия одной ОЯЧ.

Эффекты возникновения сбоя в двух или более логических элементах от воздействия одной ОЯЧ называют многократными сбоями (МС) и по числу сбившихся ячеек характеризуют кратностью. При этом МС могут возникать в физически соседних ячейках (физические МС) и в ячейках, относящихся к одному логическому блоку (логические МС). Парирование логических МС в СОЗУ требует сложных и специальных мер коррекции, позволяющих исправлять несколько сбившихся бит в логическом слове (коды по типу Рида-Соломона и т.п.), применение которых в аппаратуре требует специального нетривиального учета на этапе проектирования. Отсутствие данных о чувствительности микросхем к эффекту логических МС может привести к ситуации, когда системы коррекции информации (основанные на кодировании типа Хемминга) окажутся не эффективными при эксплуатации.

На момент начала работы в практике проведения экспериментальных исследований уровней сбоеустойчивости СОЗУ эффекты МС не учитывались. Данное обстоятельство приводило к завышению сечения насыщения сбоев от уровня линейных потерь энергии

(ЛПЭ) частиц или его отсутствию в случае чувствительности СОЗУ к МС. Как следствие требовались неоправданно избыточные усилия по коррекции ОС в космической аппаратуре.

Основным подходом, позволяющим предотвратить возникновение логических МС в СОЗУ, является топологическое разнесение элементов памяти, относящихся к одному логическому адресу. Шаг разнесения чувствительных к сбоям элементов при проектировании СОЗУ должен быть достаточным для того, чтобы возникновение физического МС не приводило к возникновению логического МС. Однако увеличение шага разнесения элементов приводит к снижению быстродействия и увеличению площади разрабатываемого изделия. Учет эффекта физических МС (в т.ч. максимальной кратности сбоев) на этапе проектирования микросхемы позволит оптимизировать шаг разнесения элементов в накопителе, выбирая его достаточным для предотвращения логических МС, но не избыточным.

В связи с этим актуальной является задача разработки методических и технических средств экспериментальных исследований МС в микросхемах памяти. Решение данной задачи основывается на моделировании и систематизации закономерностей проявления эффекта МС; анализе условий при проведении экспериментальных исследований, влияющих на кратность сбоев; разработке эффективных методик и доработки существующего экспериментального комплекса для выявления и регистрации МС, возникающих в физически соседних ячейках и в ячейках, относящихся к одному логическому блоку.

Состояние исследований по проблеме

Исследованию эффекта МС в микросхемах памяти за рубежом посвящены работы таких авторов как S. Buchner, M. Raine, G. Hubert, P. Roche, D. Giot, G. Gasiot и пр. В области методов регистрации МС можно отметить работы авторов А.М. Chugg, К. Johansson, М.А. Vajura, Р. Reviriego, J.А. Maestro. Однако в работах указанных авторов отсутствуют детальные описания методик регистрации МС при проведении экспериментальных исследований. Кроме того, в данных методиках накладываются жесткие ограничения на интенсивность потока частиц при эксперименте (не более 1 частицы за цикл считывания информации), что требует больших временных затрат.

В России на момент начала работы над диссертацией в литературе было много данных, посвященных тематике контроля и прогнозирования сбоеустойчивости микросхем СОЗУ (д.т.н. Стенин В.Я, к.т.н. Яненко А.В., к.т.н. Осипенко П.Н., к.т.н. Уланова А.В.), но практически не встречалось работ, посвященных МС. Можно отметить работы д.т.н. Чумакова А.И. (НИЯУ МИФИ), посвященные задаче определения понятия и параметров

чувствительной области к эффекту МС, д.т.н. Зебрева Г.И. (НИЯУ МИФИ) и Емельянова В.В. (ФГУП НИИП) в части методов экспериментальных и аналитических оценок чувствительности микросхем к эффектам МС.

Имеющиеся на момент начала работы аппаратно-программные средства радиационного эксперимента не обеспечивали возможность проведения полноценного автоматизированного контроля и диагностирования чувствительности статических ОЗУ (СОЗУ) к эффектам МС непосредственно в процессе облучения. Отсутствие методик регистрации МС снижало уровень достоверности исследований сбоеустойчивости микросхем СОЗУ.

Целью диссертации являлась разработка научно обоснованных методических и технических средств экспериментальных исследований эффектов МС в микросхемах СОЗУ при воздействии отдельных ядерных частиц (тяжелых заряженных частиц и высокоэнергетичных протонов) космического пространства.

Указанная цель достигалась решением в работе следующих задач:

- Разработка инженерной модели возникновения МС в физически соседних ячейках СОЗУ, позволяющей проводить предварительную оценку чувствительности к МС без проведения испытаний;
- Разработка, верификация и внедрение в практику методик оценки сбоеустойчивости СОЗУ с учетом МС, с целью получения экспериментальных данных, позволяющих оптимизировать схемы коррекции информации в аппаратуре;
- Развитие аппаратно-программных средств исследований и испытаний СОЗУ на стойкость к воздействию ОЯЧ по эффектам МС с учетом критичных режимов работы и условий эксперимента (включая температуру, угол и направление падения частиц);
- Апробация и внедрение разработанных методических и технических средств при приведении экспериментальных исследований СОЗУ для повышения их достоверности и информативности.

Научная новизна работы

1. Выявлены, изучены и систематизированы условия при проведении экспериментальных исследований, влияющие на кратность сбоев в микросхемах СОЗУ при воздействии ОЯЧ. Разработана модель, иллюстрирующая механизмы, приводящие к росту чувствительности к МС при повышенной температуре среды.

2. Предложена инженерная модель МС, позволяющая проводить оценку пороговых ЛПЭ для микросхем СОЗУ к эффекту МС, основываясь на данных о технологии изготовления и проектных нормах.

Инженерная модель позволяет предварительно оценить порог чувствительности к эффектам МС на этапе выбора элементной базы для проектирования аппаратуры, а также выбрать оптимальный шаг разнесения при проектировании микросхем. В основе модели лежит аналитическая оценка соотношения пороговых ЛПЭ ОС и МС в зависимости от проектных норм изготовления.

3. Предложена оригинальная методика экспериментальных исследований МС в физически соседних ячейках микросхем СОЗУ, позволяющая обосновано сократить время проведения эксперимента на стойкость к воздействию ОЯЧ.

Методика допускает накапливать сбои между циклами считывания информации с последующим анализом карты сбоев, основываясь на вычислении вероятности формирования МС из ОС, возникших в физически соседних ячейках. Вычисление вероятности такого события проводится исходя из максимальной кратности и формы МС, возникающих в СОЗУ при проведении исследований. Применение методики позволяет сократить время проведения эксперимента до 20 раз в зависимости от объема накопителя и времени тестирования.

Практическая значимость работы:

1. Разработана методика экспериментальных исследований МС в ячейках микросхем СОЗУ, относящихся к одному логическому блоку, позволяющая дать заключение о возможности повышения сбоеустойчивости с помощью применения схем коррекции информации.

2. Предложен базовый алгоритм выбора критичных режимов при проведении экспериментальных исследований микросхем СОЗУ для определения чувствительности к МС при воздействии ОЯЧ.

3. Разработан аппаратно-программный комплекс на базе аппаратуры National Instruments и программного обеспечения LabView, позволяющий регистрировать эффекты МС непосредственно в процессе радиационного эксперимента с отображением карты сбоев и учетом критического режима работы. Аппаратно-программный комплекс обеспечивает проведение испытаний при различных углах и направлениях воздействия на испытательном стенде «ИС ОЭПП» на базе циклотрона «У-400М» (ЛЯР ОИЯИ, г. Дубна Московской области) и в диапазоне температур.

4. Получены оригинальные результаты экспериментальных исследований 6 типов как отечественных, так и иностранных микросхем СОЗУ. Результаты вошли в отчетные материалы по различным НИОКР («2011-16-426-ЭКБ-60-011-01», «Остров», «Засечка-8», «Основа-Память-1» и др.), выполненных по заказам Минпромторга, Минобороны РФ, предприятий промышленного и космического комплекса.

5. Результаты диссертации внедрены в АО «ЭНПО СПЭЛС» и ИЭПЭ НИЯУ МИФИ в качестве базовой процедуры радиационных испытаний микросхем СОЗУ на стойкость к эффектам МС при воздействии ОЯЧ.

Результаты, выносимые на защиту:

- Инженерная модель возникновения МС в физически соседних ячейках памяти микросхем СОЗУ, позволяющая провести оценку пороговых ЛПЭ к эффекту МС, основываясь на данных о технологии изготовления и топологических нормах.

- Методика экспериментальных исследований МС в физически соседних ячейках микросхем СОЗУ, позволяющая сокращать время проведения эксперимента.

- Методика экспериментальных исследований МС в ячейках микросхем СОЗУ, относящихся к одному логическому блоку, позволяющая дать заключение о возможности повышения сбоеустойчивости микросхемы с помощью применения схем коррекции информации.

- Базовый алгоритм проведения экспериментальных исследований чувствительности микросхем СОЗУ к эффекту МС при воздействии ОЯЧ.

- Аппаратно-программный комплекс, отличающийся возможностью количественного учета эффекта МС с определением кратности сбоя в режиме реального времени с учетом критичных условий и режимов работы микросхем СОЗУ при проведении экспериментальных исследований.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации докладывались на российских научных конференциях «Радиационная стойкость электронных систем» (г.Лыткарино, 2011-2014 гг.); международных конференциях по радиационным эффектам в компонентах и системах (The Conference on Radiation Effects on Components and Systems – RADECS) (Биарриц, Франция – 2012 г., Оксфорд, Великобритания – 2013 г.), работа 2013 года отмечена дипломом Award for the RADECS 2013 Best Data Workshop Paper; межотраслевых Школах-семинарах «Радиационные испытания» (г. Дубна, 2012, 2013 гг.); научной конференции

«Электроника, микро- и наноэлектроника» (г. Суздаль, 2013 г.); 14-ом ежегодном научно-практическом семинаре «Проблемы создания специализированных радиационно-стойких СБИС на основе гетероструктур» (Нижний Новгород, 2014 г.); научных сессиях НИЯУ МИФИ (Москва, 2012-2015 гг.); 2-й Международной конференции по Радиации и Дозиметрии в различных областях исследований (2th International Conference on Radiation and applications in Various Fields of research «RAD 2014») (Ниш, Сербия, 2014 г.); 9-й молодежной научно-технической конференции «Высокие технологии в атомной отрасли. Молодежь в инновационном процессе» (Нижний Новгород, 2014 г.); 6-й Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2014, МЭС-2014» (Зеленоград, 2014 г.).

Основные результаты диссертации опубликованы в 27 работах (в период с 2011 по 2014 гг.), в том числе в 6 работах из перечня ВАК, в 3 работах в базе данных Scopus.

При участии автора была разработана программа для ЭВМ «SEUSIM» для моделирования сбоев в КМОП КНИ и КМОП ИС на объемном кремнии при воздействии отдельных ядерных частиц или при импульсном ионизирующем воздействии (свидетельство о государственной регистрации № 2014662253).

Объем и структура диссертации.

Диссертация содержит 121 страницу, в том числе 75 рисунков, список литературы из 122 наименований и состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературных источников.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В первой главе представлена классификация эффектов МС, характерных для КМОП СОЗУ. Приведены результаты анализа, направленного на выявление основных методических и технических средств, необходимых для осуществления регистрации МС. Обосновывается актуальность темы диссертации для современных микросхем КМОП СОЗУ, описывается проблемная ситуация на момент начала работы над диссертацией, формулируются основные задачи работы.

Во второй главе изложены разработанные методики оценки чувствительности микросхем СОЗУ к МС, включающие в себя инженерную модель, позволяющую дать оценку чувствительности к эффекту МС без проведения эксперимента, и методики экспериментальных исследований МС в физически соседних ячейках памяти и ячейках, относящихся к одному логическому блоку.

В третьей главе предложен базовый алгоритм проведения экспериментальных исследований к эффектам МС, основанный на анализе механизмов, которые могут приводить к росту кратности сбоев. Описан разработанный аппаратно-программный комплекс, позволяющий проводить экспериментальную оценку чувствительности к эффекту МС с учетом критичных режимов.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований, проведенных в соответствии с разработанным базовым алгоритмом. Предложены разработанные рекомендации по снижению чувствительности к эффекту МС на этапе проектирования микросхем, основанные на анализе экспериментальных данных.

Анализ проблемной ситуации

Уменьшение проектных норм изготовления микросхем СОЗУ приводит к снижению внутренней эффективной емкости и напряжения питания ячейки памяти, а также к размещению соседних элементов на расстояниях порядка единиц и долей микрон. Вследствие подобных изменений, уменьшается критический заряд, достаточный для сбоя бита памяти, с соответствующими ему значениями пороговых ЛПЭ, и становится возможным собирание заряда с трека ОЯЧ несколькими соседними элементами (рисунки 1 и 2). В связи с этим возрастает вероятность возникновения сбоя в нескольких элементах памяти при воздействии одной ОЯЧ – многократного сбоя.

Анализ проблемной ситуации позволил выявить наиболее критичные направления в вопросах исследования МС (рисунок 3), на устранение которых и была направлена диссертационная работа. Проведенный анализ показал, что в России на момент начала работы отсутствовали методические и технические средства проведения радиационного эксперимента для определения чувствительности микросхем СОЗУ к эффектам МС.

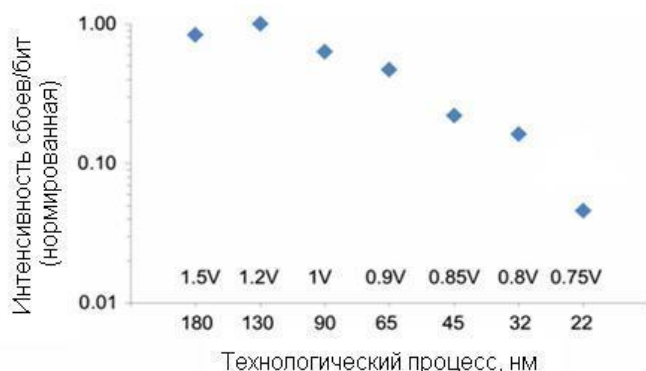


Рисунок 1 – Тенденция изменения интенсивности сбоев при переходе к меньшим проектным нормам

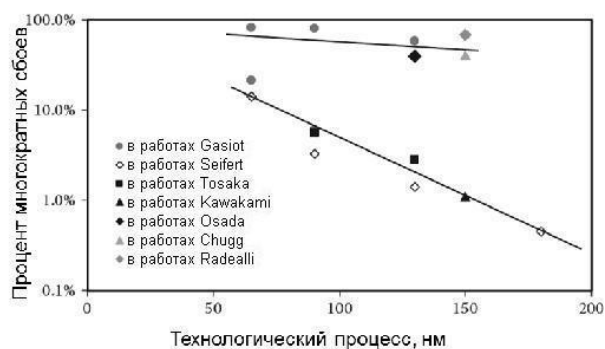


Рисунок 2 – Увеличение доли многократных сбоев при переходе к меньшим проектным нормам

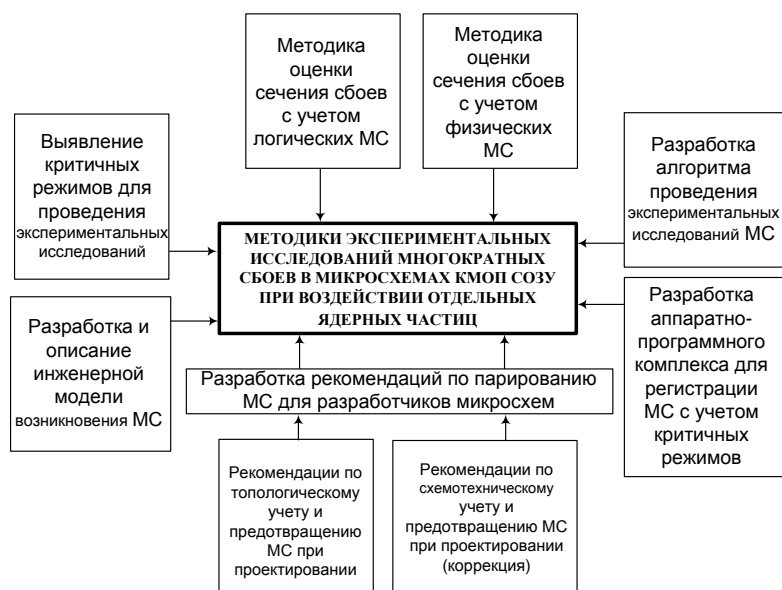


Рисунок 3 – Анализ проблемной ситуации

Инженерная модель многократных сбоев

для задач предварительной оценки чувствительности

Целью разработки инженерной модели было получение возможности проведения предварительной оценки чувствительности (пороговых ЛПЭ) к эффекту МС, основываясь на данных о технологии изготовления и топологических нормах. Инженерная модель представляет собой набор аналитических оценок, представленных в графическом виде как зависимость пороговых ЛПЭ от проектных норм.

В основу инженерной модели легли оценки пороговых ЛПЭ для различных технологий, полученные из выражения:

$$\frac{q \cdot L_{zo} \cdot \rho \cdot L_{ef}}{C} \approx \Delta U_{ном}, \quad (1)$$

где q – заряд электрона, L_{zo} – пороговые ЛПЭ ОС, ρ – плотность вещества, L_{ef} – эффективная величина собирания заряда за счет дрейфа и диффузии, C – эквивалентная емкость элемента, $\Delta U_{ном}$ – помехоустойчивость элемента.

Оценки пороговых ЛПЭ МС проводились исходя из выражения, описывающего диффузионную компоненту ионизационного тока в случае формирования ионизационной реакции в пассивной области, т.е. при прохождении ядерной частицы за пределами р-п перехода, путем вычитания токов, полученных для разных площадей:

$$I_{df-p}(t) \approx \frac{qD_d G \cdot A_{pn}}{\sqrt{\pi D_d t} \cdot \pi \cdot (r_{o2}^2 - r_{o1}^2)} \exp\left(-\frac{r_{o1}^2}{4D_d t}\right) \cdot \frac{1}{1+t/t_2} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{R_o^2}{4D_d t}\right)\right), \quad (2)$$

где A_{pn} – площадь чувствительной области (p-n перехода), r_{o1} и r_{o2} – расстояние от места прохождения трека от ближайшей и дальней стороны чувствительной области, G - линейная генерация носителей заряда ($G=L_z \rho / \epsilon_i$), τ – время жизни в подложке, D_d - коэффициент диффузии для неосновных носителей заряда, D_a - коэффициент амбиполярной диффузии.

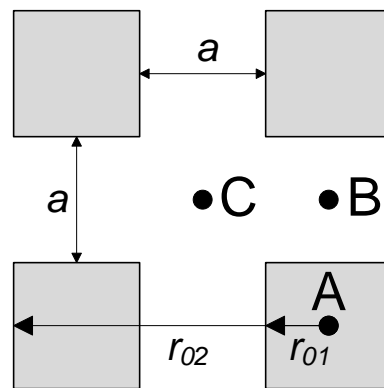
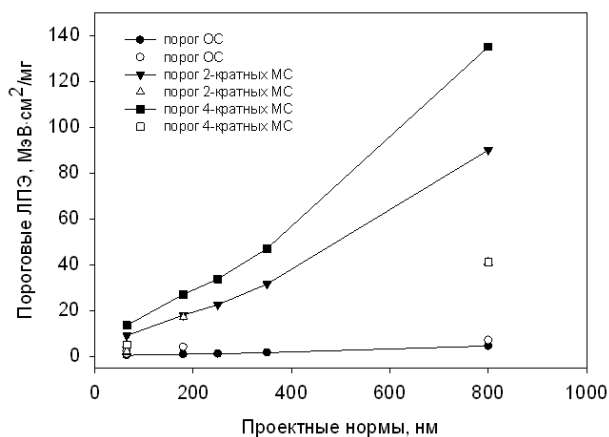


Рисунок 4 – Зависимость порога возникновения сбоев различной кратности от проектных норм. Черные маркеры – расчетные данные, белые маркеры - экспериментальные данные

Рисунок 5 – Модельная топология расположения чувствительных областей для оценок кратности сбоя

На рисунке 4 представлены зависимости пороговых ЛПЭ от проектных норм, оцененные с применением инженерной модели, для модельной топологии (рисунок 5) и сравнение данных оценок с экспериментальными данными, полученными автором работы. При выполнении расчетов предполагалось, что в упрощенном виде возникновение 2-кратного сбоя наиболее вероятно при попадании в точку В, а 4-кратного в точку С.

Методика экспериментальных исследований многократных сбоев в физически соседних ячейках

Регистрация МС при проведении экспериментальных исследований требует соблюдения условия: не более одного воздействия за цикл считывания. Соблюдение данного условия в случае возникновения сбоев в нескольких ячейках памяти позволяет однозначно утверждать, что произошел МС, а не несколько ОС. Однако проведение такого эксперимента требует значительных временных затрат и не всегда возможно на доступных испытательных стендах в связи с ограничениями на минимальную плотность потока частиц.

Разработанная автором методика экспериментальных исследований МС в физически соседних ячейках позволяет проводить эксперимент, накапливая между циклами считывания к сбоев:

$$k \leq \frac{e \cdot (M \cdot N)}{x} + 1 \quad (3)$$

где k – число сбившихся ячеек за цикл считывания, M – число бит в слове, N – число адресов, e – допустимая доля ложных МС (сбоев двух и более соседних ячеек от нескольких частиц), x – переменная, определяемая максимальной кратностью и формой сбоев.

В основе методики экспериментальных исследований МС в физически соседних ячейках лежит оценка зависимости вероятности формирования n -кратного ложного МС от емкости микросхемы и числа произошедших сбоев за цикл считывания. При рассмотрении сбоя, произошедшего в накопителе, вероятность возникновения сбоя в соседней ячейке, образующим с первым ложный сбой (сбой двух или более соседних ячеек от нескольких частиц) можно представить в виде:

$$P_{лож}(n_{max}) \leq \frac{z}{M \cdot N} \quad (4)$$

где $P_{лож}(n_{max})$ это вероятность, что второй ОС образует ложный сбой с первым сбоем, z - число возможных позиций для формирования ложного МС, M -число бит в слове, N -число адресов.

Важно отметить, что число z в числителе выражения (4) определяется тем, в скольких соседних ячейках может возникнуть сбой, приводящий к формированию ложных МС, т.е. сбоев, возникающих в смежных ячейках памяти от нескольких ОЯЧ. Для выбора числа z необходимо учитывать максимальную кратность МС, возникающих в накопителе и их форму, т.к. для МС одинаковой кратности разной формы число позиций, в которых может возникнуть ложный сбой, будет различным.

Подобные рассуждения могут быть применены для большего числа событий, чем два. В таком случае вероятность возникновения ложного МС будет возрастать с ростом числа событий и вероятность, что i -й сбой сформирует ложный МС будет определяться выражением:

$$P_{лож}(n_{max})^i \leq \frac{z \cdot (i - 1)}{M \cdot N} \quad (5)$$

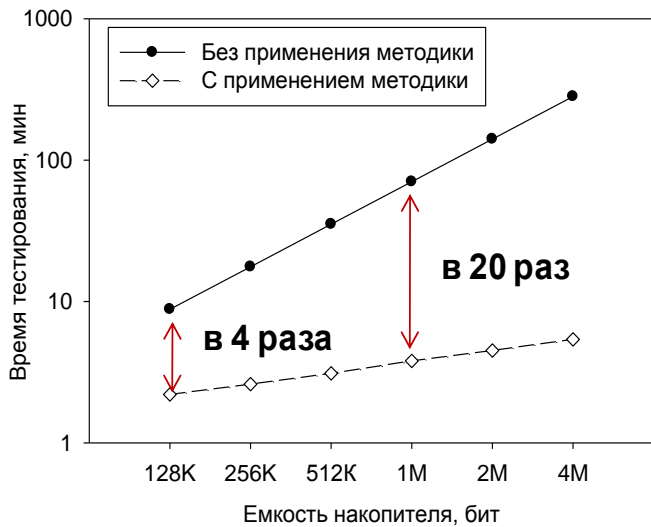


Рисунок 6 – Среднее время проведения экспериментальных исследований микросхем СОЗУ различной емкости при воздействии ТЗЧ на стойкость к эффектам сбоев

Выражение типа (3) можно получить, устремив вероятность возникновения ложного МС на информационной карте накопителя после k сбоев к некому значению e (допустимая доля ложных МС).

Применение методики позволяет значительно сократить время проведения эксперимента. Как видно из рисунка 6, например, для микросхем емкостью 128 Кбит время проведения эксперимента при воздействии ТЗЧ в случае применения методики сократится в 4 раза, а для микросхем емкостью 1 Мбит – в 20 раз.

Общая методика испытаний и экспериментальных исследований многократных сбоев в микросхемах статических ОЗУ при воздействии отдельных ядерных частиц

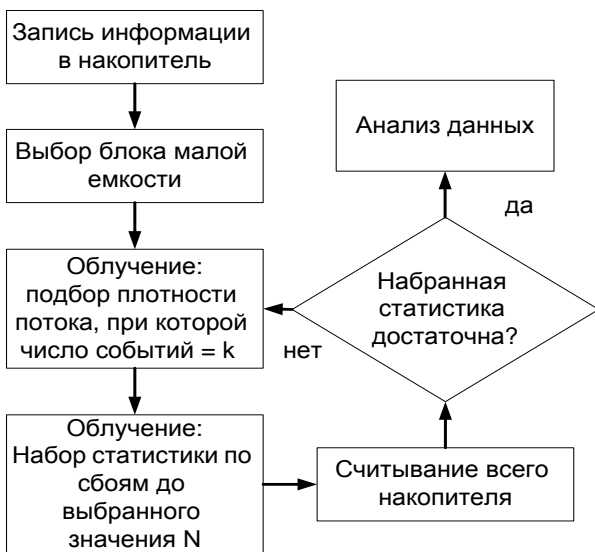


Рисунок 7 – Алгоритм проведения экспериментальных исследований чувствительности к эффектам МС микросхем СОЗУ большой емкости

Проведение тестирования всего накопителя микросхемы с применением методики экспериментальных исследований МС в физически соседних ячейках не учитывает долю ячеек, расположенных по краям внутренних блоков памяти. В целях повышения эффективности методики для микросхем большой емкости автором предложено проводить оценку МС только в малой части накопителя с последующим масштабированием полученных результатов. Алгоритм проведения эксперимента представлен на рисунке 7, в соответствии с которым контроль сбоев проводится по методике экспериментальных исследований МС в физически соседних ячейках, но только для части накопителя. На заключительном этапе проводится сравнение общего количества зарегистрированных сбоев для всего накопителя и сопоставление их с результатами прогноза, полученных методом масштабирования.

Для тестирования части накопителя, следует выбирать область, не содержащую блоков, разделенных между собой периферийными цепями, занимающими значительные площади, что позволит снизить долю случаев, когда МС не возникает в ячейках, расположенных по краям блоков. Рекомендуемый размер области для тестирования должен составлять около $32K \times 8$ и включать в себя ячейки, относящиеся ко всем разрядам слова. Проводимое на последнем этапе эксперимента сравнение результатов, полученных для малого блока и для всего накопителя, необходимо для подтверждения правомерности выбора малого блока в качестве характеризующего чувствительность микросхемы.

С учетом предельной частоты тестирующего оборудования при радиационном эксперименте (как правило, 10 МГц), предложенный подход позволяет проводить эксперименты не с минимальной плотностью потока частиц.

Методика экспериментальных исследований многократных сбоев в ячейках, относящихся к одному логическому блоку

Среди возможных причин возникновения логических МС можно выделить сбои в периферийных узлах СОЗУ и физические МС, приводящие к логическим МС.

Для выявления возможности возникновения сбоев в периферийных узлах СОЗУ в рамках работы над диссертацией был разработан и апробирован следующий порядок проведения экспериментальных исследований:

1. Испытания в динамическом режиме при воздействии ОЯЧ;
2. Испытания в статическом режиме при воздействии ОЯЧ;
3. Сравнение сечений эффектов (1) и (2). В случае отличия, проведение исследований чувствительности периферийных узлов с использованием источника сфокусированного лазерного излучения.

С целью определения чувствительности микросхемы к эффектам логических МС, возникающих вследствие физических МС, оптимальным представляется эксперимент с использованием источника сфокусированного лазерного излучения (совместно с калибровкой при воздействии ТЗЧ), проводимый в следующей последовательности:

1. Воздействие в область накопителя с фиксированным диаметром пятна, увеличивая энергию до момента регистрации логического МС;
2. Оценка эквивалентных ЛПЭ, при которых возникает/не возникает логический МС.

Разработанные методики позволяют выявлять микросхемы потенциально чувствительные к возникновению сбоев одновременно в больших объемах информации, а также

проводить более корректную оценку частоты сбоев для заданных условий эксплуатации (с учетом порога возникновения логических МС, возникающих вследствие физического МС).

Базовый алгоритм проведения экспериментальных исследований чувствительности микросхем СОЗУ к эффекту МС при воздействии ОЯЧ

Для разработки базового алгоритма были выявлены, изучены и систематизированы условия проведения экспериментальных исследований, влияющие на кратность сбоев в микросхемах СОЗУ при воздействии ОЯЧ. В результате рассмотрения механизмов, влияющих на кратность сбоев, были сделаны выводы, позволяющие выбрать более критичный режим для проведения экспериментальных исследований с целью определения чувствительности к эффектам МС:

- ЛПЭ частиц: чем больше ЛПЭ ТЗЧ при воздействии, тем большее число чувствительных областей соседних ячеек расположено в области диффузионного собирания заряда, и, как следствие, кратность регистрируемых МС.

- Угол и направление воздействия ТЗЧ: при росте угла воздействия трек частицы располагается геометрически ближе к соседним чувствительным областям, вследствие чего происходит более эффективное диффузионное собирание заряда несколькими ячейками памяти. Важную роль играет направление падения частицы при различных углах воздействия: в зависимости от расположения областей карманов и геометрии ячейки, полученный результат при воздействии вдоль строк и вдоль столбцов может значительно отличаться в части максимальной кратности сбоев и доли МС.

- Записанная информация: в зависимости от того, какая информация записана в соседние ячейки СОЗУ (одинаковая или инверсная) взаимное расположение чувствительных областей в них будет различным. При этом максимальная кратность МС при воздействии ОЯЧ может отличаться в несколько раз.

- Температура объекта: в рамках работы было установлено, что проведение экспериментальных исследований при повышенной температуре среды может приводить к росту чувствительности к эффектам сбоев и, в том числе, к эффекту МС.

На увеличение кратности МС при росте температуры может оказывать влияние изменение (1) подвижности (коэффициента диффузии), (2) параметров р-п перехода, (3) темпа рекомбинации, (4) напряжения переключения ячейки памяти и (5) коэффициента усиления (β) паразитного биполярного транзистора, образованного переходом сток/исток при воздействии ТЗЧ. Проведенный анализ позволил сделать вывод о том, что изменения пара-

метров физических процессов (1)-(3) не могут вносить существенного вклада в рост чувствительности к МС.

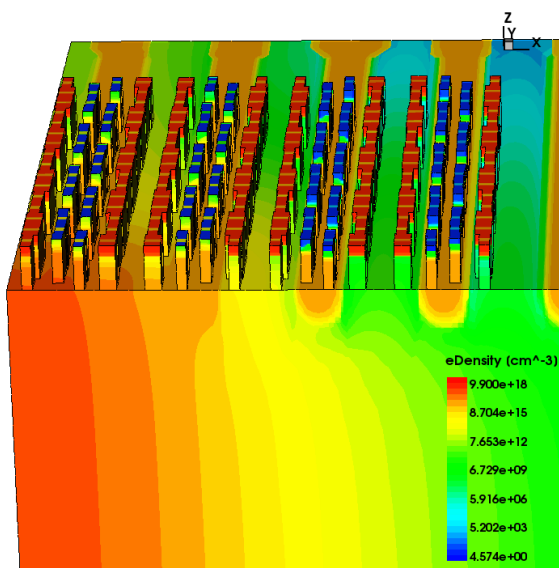


Рисунок 8 – Распределение электронной плотности для структуры СОЗУ 65 нм в момент времени 10^{-11} с при воздействии ионов с ЛПЭ=40 МэВ·см²/мг.

структурах. Также было подтверждено усиление влияния паразитного биполярного эффекта

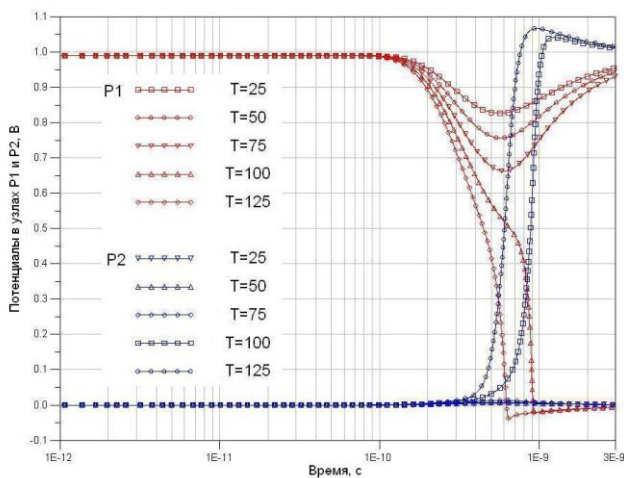


Рисунок 9 – Зависимость сбоеустойчивости ячейки СОЗУ 65 нм от температуры

при температурах среды +100°C и +125°C, что подтверждается экспериментом.

- Воздействие высокоэнергичных протонов: для структур, чувствительных к МС, необходимо проводить испытания при воздействии высокоэнергичных протонов (ВЭП), т.к. расчетная оценка на основе данных о чувствительности при воздействии ТЗЧ не позволяет учесть кратность сбоев в результате ядерной реакции от ВЭП.

Рассмотрение влияния критериев (4) и (5) проводилось для структур СОЗУ TS5 (6Т) 65 нм, в которых при проведении экспериментальных исследований наблюдался рост максимальной кратности МС при повышении температуры от +25°C до +125°C с 8 до 15, соответственно.

Моделирование воздействия ТЗЧ на структуру СОЗУ TS5 (6Т) 65 нм в TCAD Sentaurus (рисунок 8) позволило сделать вывод о существенном влиянии паразитного биполярного эффекта на возникновение эффектов МС в объемных КМОП структурах. Также было подтверждено усиление влияния паразитного биполярного эффекта с ростом температуры.

Основываясь на полученных зависимостях ионизационного тока, при SPICE-моделировании ячейки СОЗУ TS5 было подтверждено влияние температуры среды на порог переключения ячейки памяти. Как видно из рисунка 9 переключение ячеек, находящихся на удалении от места попадания частицы, соответствующего кратности сбоев 15, происходит только

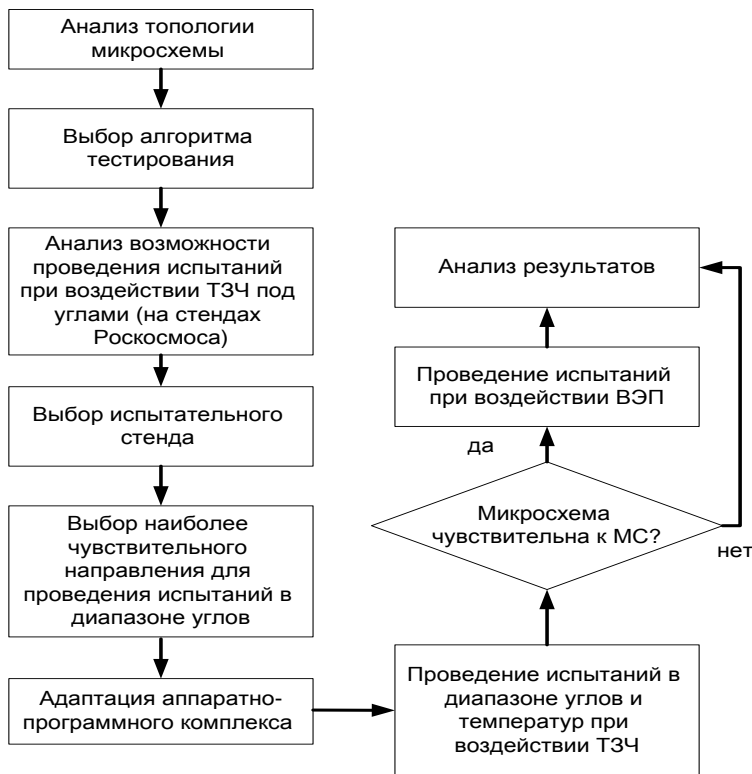


Рисунок 10 – Базовый алгоритм проведения экспериментальных исследований чувствительности СОЗУ к МС

На рисунке 10 представлена схема проведения экспериментальных исследований эффектов МС согласно базовому алгоритму, в котором учтены описанные ранее особенности проявления МС в зависимости от режима.

Проведенные в рамках работы над диссертацией экспериментальные исследования согласно базовому алгоритму свидетельствуют о значительном влиянии обозначенных условий проведения эксперимента на максимальную кратность МС и долю МС от общего числа наблюдаемых сбоев.

В таблице 1 приведены экспериментальные результаты для 4 типов СОЗУ, полученные при различных условиях работы (данные представлены в формате максимальная кратность МС/ЛПЭ, при котором наблюдались МС такой кратности).

На рисунке 11 приведены гистограммы, иллюстрирующие зависимости кратности сбоев от ЛПЭ ТЗЧ и при воздействии ВЭП (10а), а также от температуры среды (10б) для СОЗУ TS5 (6Т), изготовленных по КМОП технологии 65 нм.

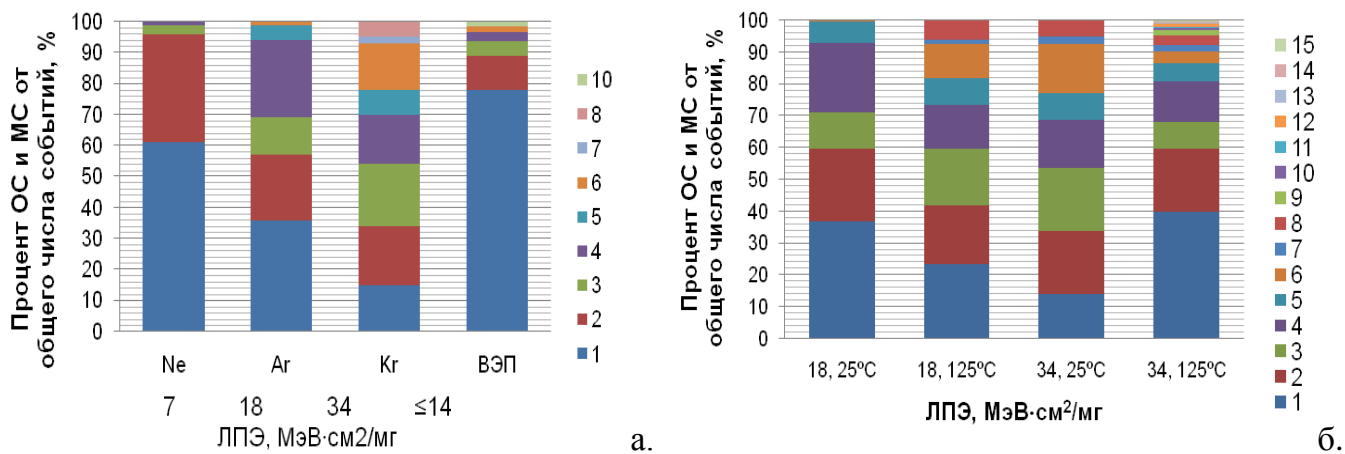


Рисунок 11 – Доля ОС и МС в СОЗУ TS5 (6Т) при различных углах воздействия (а) и температуре среды (б)

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований СОЗУ согласно базовому алгоритму

| Условия проведения эксперимента | | Значение | Максимальная кратность МС/ ЛПЭ, ед./ МэВ·см ² /мг | | | | |
|---------------------------------|-------------------------|----------------|--|-----------------------|-------------------|------------------------|----------|
| | | | СОЗУ 256Кбит | СОЗУ 4 Мбит | TS5 (6T) | TS5 (6T_GR) | |
| Воздействие ТЗЧ | ЛПЭ частиц | Разное ЛПЭ | 2 / 16 3 / 68 | 2 / 68 | 10 / 65 | 3 / 34 | |
| | Угол воздействия | 60 | 3 / 82 | 3 / 38 | 6 / 18 | 2 / 18 | |
| | | 45 | 3 / 57 | 2 / 92 | 8 / 27 | 2 / 27 | |
| | | 30 | - | - | 11 / 65 | 3 / 65 | |
| | Направление воздействия | вдоль строк | - | 2 / 92 (МС(2)=15%) | 4 / 18 | 2 / 18 (МС(2)=1%) | |
| | | вдоль столбцов | - | 3 / 38 (МС(2)=29%) | 6 / 18 | 3 / 18 (МС(2)=20%) | |
| | Записанная информация | гладкий код | - | - | 5 / 11 6 / 18 | 2 / 18 | |
| | | инверсный код | - | - | 3 / 11 4 / 18 | 2 / 18 | |
| | Температура объекта, °С | 25 | 3 / 68 | 3 / 38 | 6 / 18 8 / 34 | 3 / 34 (МС(3)<0,1%) | |
| | | 60 | - | - | 8 / 18 | - | |
| | | 125 | - | - | 8 / 18 15 / 34 | 3 / 34 (МС(3)=1%) | |
| | Воздействие ВЭП | | 1 ГэВ | - | - | 10 / ≤ 30 | 2 / ≤ 30 |

Аппаратно-программный комплекс для регистрации эффектов многократных сбоев

Адаптация аппаратно-программного комплекса на базе оборудования National Instruments (рисунок 12) проводилась в части реализации возможности контроля МС в СОЗУ в критичном режиме при проведении экспериментальных исследований. В рамках адаптации автором были разработаны блок задания температуры объекта и блок управления углом падения ионов в вакуумной камере на испытательном стенде «ИС ОЭПП» на базе циклотрона «У-400М» (ЛЯР ОИЯИ, г. Дубна Московской области).

Блок задания температуры обеспечивает температуру корпуса объекта в диапазоне от +25 до +125 °С и контроль температуры. Кроме функции нагрева система обеспечит функцию стабилизации температуры на заданном уровне в случае сильного разогрева микросхемы при работе в динамическом режиме.

Блок управления углом падения ионов, устанавливаемый на поворотный механизм вакуумной камеры, позволяет дистанционно задавать поворот рамки на заданный угол. Задание угла производится управляющей программой, разработанной на базе платформы LabView (National Instruments). Предусмотрен видео контроль установленного угла рамки.

Для количественного учета эффекта МС с определением кратности сбоев в режиме реального времени при проведении экспериментальных исследований разработано про-

граммное обеспечение, включающее в себя функцию построения карты памяти и учета числа эффектов в соответствии с их кратностью и формой сбоев.

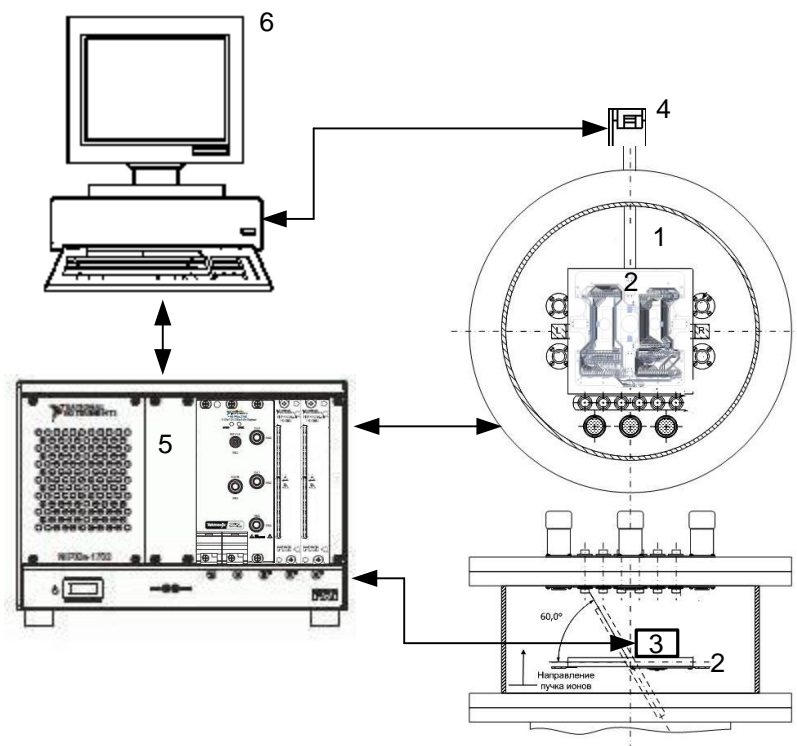


Рисунок 12 –Аппаратно-программный комплекс для регистрации эффектов МС: 1 – вакуумная камера; 2 - плата с объектом испытаний; 3 - блок задания температуры; 4 – блок управления углом падения ионов; 5 - измерительный блок; 6 - вычислительный блок с возможностью построения карты памяти и учета кратности МС.

Заключение

Основным результатом диссертации является решение актуальной научно-технической задачи разработки и внедрения методических и технических средств экспериментальных исследований эффектов многократных сбоев в микросхемах статических оперативных запоминающих устройств нового поколения при воздействии отдельных ядерных частиц (тяжелых заряженных частиц и высокоэнергичных протонов), имеющей существенное значение для создания новых и совершенствования существующих элементов и устройств систем управления, вычислительной техники и целевой аппаратуры военного, космического и двойного назначения, повышения их функциональных и эксплуатационных характеристик, а также эффективности применения.

Основные научные результаты диссертации заключаются в следующем:

1. Выявлены, изучены и систематизированы условия при проведении экспериментальных исследований, влияющие на кратность сбоев в микросхемах СОЗУ при воздей-

ствии ОЯЧ. Разработана модель, иллюстрирующая механизмы, приводящие к росту чувствительности к МС при повышенной температуре среды.

С целью выявления механизмов, влияющих на рост кратности сбоев при повышенной температуре среды, было проведено моделирование, в результате которого было установлено, что изменения подвижности носителей, параметров р-п перехода и темпа рекомбинации компенсируют друг друга и не приводят к существенным изменениям ионизационного тока при воздействии ОЯЧ. Основными механизмами, приводящими к росту кратности сбоев, являются уменьшение порогового напряжения переключения ячейки памяти при росте температуры и рост коэффициента усиления паразитного биполярного транзистора.

2. Предложена инженерная модель МС, позволяющая проводить оценку пороговых ЛПЭ для микросхем СОЗУ к эффекту МС, основываясь на данных о технологии изготовления и проектных нормах.

Инженерная модель позволяет предварительно оценить порог чувствительности к эффектам МС на этапе выбора элементной базы для проектирования аппаратуры, а также выбрать оптимальный шаг разнесения при проектировании микросхем. В основе модели лежит аналитическая оценка соотношения пороговых ЛПЭ ОС и МС в зависимости от проектных норм изготовления. Правомерность применения цилиндрической геометрии для оценки диффузионной составляющей ионизационного тока подтверждена путем проведения численных расчетов в программе DIODE-2С.

3. Предложена оригинальная методика экспериментальных исследований МС в физически соседних ячейках микросхем памяти, позволяющая обосновано сократить время проведения эксперимента на стойкость к воздействию ОЯЧ до 20 раз. Методика допускает накапливать сбои между циклами анализа карты сбоев, основываясь на вычислении вероятности формирования МС из ОС, возникших в физически соседних ячейках. Вычисление вероятности такого события проводится исходя из максимальной кратности сбоев, возникающих в СОЗУ при проведении исследований.

Основной практический результат диссертации заключается в разработке базового алгоритма выбора критичных режимов для проведения экспериментальных исследований микросхем СОЗУ с целью количественного определения чувствительности к ОЯЧ по эффектам МС.

Частные практические результаты работы и их реализация:

1. Разработана методика экспериментальных исследований МС в ячейках микросхем СОЗУ, относящихся к одному логическому блоку, позволяющая дать заключение о воз-

возможности повышения сбоеустойчивости с помощью применения схем коррекции информации.

2. Разработан аппаратно-программный комплекс на базе аппаратуры National Instruments и программного обеспечения LabView, позволяющий регистрировать эффекты МС непосредственно в процессе радиационного эксперимента с отображением карты сбоев с учетом критического режима работы, а также обеспечивать проведение испытаний при различных углах воздействия на испытательном стенде «ИС ОЭПП» на базе циклотрона «У-400М» (ЛЯР ОИЯИ, г. Дубна Московской области) и в диапазоне температур.

3. Полученные оригинальные результаты экспериментальных исследований 6 типов как отечественных, так и иностранных микросхем СОЗУ вошли в отчетные материалы по различным НИОКР («2011-16-426-ЭКБ-60-011-01», «Остров», «Засечка-8», «Основа-Память-1»), выполненных по заказам Минпромторга, Минобороны РФ, предприятий промышленного и космического комплекса.

4. Результаты диссертации внедрены в АО «ЭНПО СПЭЛС» и ИЭПЭ НИЯУ МИФИ в качестве базовой процедуры радиационных испытаний микросхем памяти на стойкость к эффектам МС при воздействии ОЯЧ.

Таким образом, в ходе работы над диссертацией **достигнута ее основная цель**, а именно разработаны научно обоснованные методические и технические средства экспериментальных исследований эффектов многократных сбоев в микросхемах статических оперативных запоминающих устройств при воздействии отдельных ядерных частиц (тяжелых заряженных частиц и высокоэнергетичных протонов) космического пространства.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

1. А.Б. Боруздина, А.И. Чумаков, А.В. Уланова, А.Ю. Никифоров, А.Г. Петров. «Выявление многократных сбоев в микросхемах СОЗУ от воздействия отдельных заряженных частиц космического пространства»// «Известия вузов. Электроника», №5(97), 2012 – М.: МИЭТ, 2012. – с. 44-48
2. А.Б. Боруздина, Н.Г. Григорьев, А.В. Уланова. «Влияние топологического размещения ячеек в микросхемах памяти на кратность сбоев от ТЗЧ»// Микроэлектроника, том 43, номер 2, 2014– М.: Наука, 2014, с. 88-93
3. А.Б. Боруздина, А.В. Уланова, М.С. Горбунов, А.И. Чумаков. «Влияние угла падения тяжелых заряженных частиц и записанного кода на кратность сбоев в микросхемах СОЗУ» // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2014. Сборник трудов. М.: ИППМ РАН, 2014. Часть 3. с.181-184
4. M.S. Gorbunov, P.S. Dolotov, A.A. Antonov, G.I. Zebrev, V.V. Emeliyanov, A.B. Boruzdina, A.G. Petrov, and A.V. Ulanova. «Design of 65 nm CMOS SRAM for Space Applications: A Comparative Study»// IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 61, no. 4, pp. 1575-1582, 2014
5. Д.В. Бобровский, Г.Г. Давыдов, А.Г. Петров, А.В. Яненко, А.О. Ахметов, А.Б. Боруздина, О.А. Калашников, Л.Н. Кессаринский, П.В. Некрасов, А.Ю. Никифоров, А.В. Уланова. «Реализация базовых методов радиационных испытаний ЭКБ на основе аппаратно-программного комплекса аппаратуры National Instruments»// «Известия вузов. Электроника», №5(97), 2012 – М.: МИЭТ, 2012. – с. 91-104
6. А.А.Орлов, А.В.Уланова, А.Б.Боруздина. «Обеспечение радиационной стойкости микросхем энергонезависимых сегнетоэлектрических запоминающих устройств»// «Спецтехника и связь», выпуск 4-5, Москва, 2011, стр. 52-56
7. А.Б. Боруздина, А.В. Уланова, Н.Г. Григорьев, А.Ю. Никифоров. «Дозовая деградация динамических параметров микросхем памяти»// Микроэлектроника, том 41, номер 4, 2012– М.: Наука, 2012, с. 284-290
8. А.Б. Боруздина, «Алгоритмы функционального контроля ОЗУ при воздействии дозы ионизирующего излучения» // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2012. Аннотации докладов. – М.: НИЯУ МИФИ, том 1, 2012, с. 98
9. А.Б. Боруздина. «Исследование диагностических способностей алгоритмов тестирования микросхем памяти при воздействии ионизирующего излучения»// Радиационная стойкость электронных систем – «Стойкость-2012», выпуск 15, Москва, 2012, стр. 225-226
10. А.Б. Боруздина. «Зависимость кратности сбоев от угла падения ТЗЧ относительно нормали к поверхности кристалла в микросхемах статических ОЗУ»// 16-я Международная телекоммуникационная конференция молодых ученых и студентов «МОЛОДЕЖЬ И НАУКА». Тезисы докладов. – Ч.1.М.: НИЯУ МИФИ, 2013, с.72-73
11. А.Б. Боруздина. «Экспериментальная проверка применимости методики подсчета многократных сбоев в СОЗУ»// Радиационная стойкость электронных систем – «Стойкость-2013», выпуск 16, Москва, 2013, стр. 103-104

12. А.Б. Боруздина. «Влияние алгоритма тестирования на кратность сбоя в КМОП СОЗУ 65 нм от тяжелых заряженных частиц»// 17-я Международная телекоммуникационная конференция молодых ученых и студентов «МОЛОДЕЖЬ И НАУКА». Тезисы докладов. – Ч.1.М.: НИЯУ МИФИ, 2014, с.64-65
13. А.Б.Боруздина, А.В.Уланова, А.К. Лабкович. «Аппаратно-программный комплекс контроля деградации времени выборки микросхем памяти при дозовом воздействии»// Радиационная стойкость электронных систем – «Стойкость-2011», выпуск 14, Москва, 2011, стр. 217-218
14. А.Б. Боруздина, А.А. Орлов, А.В. Уланова, А.Г. Петров. «Исследование дозовой стойкости структурных блоков микросхем FRAM» // Радиационная стойкость электронных систем – «Стойкость-2012», выпуск 15, Москва, 2012, стр. 141-142
15. А.Б. Боруздина, А.В. Уланова, А.Г. Петров. «Методика количественной оценки вклада многократных сбоев в общее число событий в ОЗУ от отдельных заряженных частиц». //Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сборник научных трудов – М.: НИЯУ МИФИ, 2012, с.73-79
16. А.Б. Боруздина, Н.Г. Григорьев, А.В. Уланова. «Влияние топологического размещения ячеек в микросхемах памяти на кратность сбоев от ОЯЧ»// Научная сессия НИЯУ МИФИ-2013. Аннотации докладов. – М.: НИЯУ МИФИ, том 1, 2013, с. 97
17. А.Б. Боруздина, А.Н. Бочков, С.М. Игнатъев, А.С. Лушников, В.Д. Мещанов, Н.А. Подпригора, Е.С. Рыбалко, А.В. Уланова, Н.А. Шелепин. «Радиационностойкие микросхемы памяти емкостью 1М-16М. Результаты разработки и испытаний». //Сборник трудов 8-го ежегодного научно-практического семинара «Проблемы создания специализированных радиационно-стойких СБИС на основе гетероструктур», 2013, с. 24-28
18. А.Б. Боруздина, М.С. Горбунов. «Эффекты многократных сбоев в СОЗУ при воздействии ионов под различными углами падения» // Радиационная стойкость электронных систем – «Стойкость-2013», выпуск 16, Москва, 2013, стр. 99-100
19. А.Б. Боруздина, Н.Г. Григорьев, А.В. Уланова. «Влияние реализации топологии ячеек микросхем памяти на чувствительность к эффектам многократных сбоев» // Радиационная стойкость электронных систем – «Стойкость-2013», выпуск 16, Москва, 2013, стр. 105-106
20. А.Б. Боруздина, А.В. Уланова. «Применимость методики подсчета многократных сбоев в СОЗУ, позволяющей уменьшить время проведения эксперимента». //Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сборник научных трудов – М.: НИЯУ МИФИ, 2013, с.20-26
21. М.С. Горбунов, П.С. Долотов, В.Е. Шунков, А.А. Антонов, Г.И. Зебрев, В.В. Емельянов, А.Б. Боруздина, А.Г. Петров, А.В. Уланова. «Сравнение сбоеустойчивости ячеек памяти статического КМОП ОЗУ с проектной нормой 65 нм». //Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сборник научных трудов – М.: НИЯУ МИФИ, 2013, с.8-19
22. А.Б. Боруздина, А.Л. Васильев, А.Г. Петров. «Повторные сбои в ОЗУ при испытаниях на стойкость к воздействию отдельных ядерных частиц». // Радиационная стойкость электронных систем – «Стойкость-2014», выпуск 17, Москва, 2014, стр. 120-122.

23. А.Б. Боруздина, А.В. Уланова, А.И. Чумаков. «Развитие методического подхода по выявлению многократных сбоев в микросхемах памяти». //Радиационная стойкость электронных систем – «Стойкость-2014», выпуск 17, Москва, 2014, стр. 123-124
24. А.Б. Боруздина, А.В. Уланова, А.А. Смолин, А.Ю. Никифоров. «Влияние напряжения отрицательного смещения на подложке на сбоеустойчивость КНИ СОЗУ 1Мбит при воздействии тяжелых заряженных частиц». //Радиационная стойкость электронных систем – «Стойкость-2014», выпуск 17, Москва, 2014, стр. 143-144
25. А.Б. Боруздина, А.В. Уланова, А.И. Чумаков, М.С. Горбунов. «Влияние алгоритма тестирования на кратность сбоев в КМОП СОЗУ 65 нм от тяжелых заряженных частиц». //Радиационная стойкость электронных систем – «Стойкость-2014», выпуск 17, Москва, 2014, стр. 145-146
26. Boruzdina, A.V., Ulanova, A.V. ; Petrov, A.G. ; Telets, V.A. Verification of SRAM MCUs calculation technique for experiment time optimization // Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), 2013 14th European Conference, pp.1-4
27. Боруздина А.Б., Григорьев Н.Г., Уланова А.В., Скоробогатов П.К., Никифоров А.Ю., Телец В.А., Чумаков. А.И., Яненко А.В. «Программа «SEUSIM» для моделирования сбоев в КМОП КНИ и КМОП ИС на объемном кремнии при воздействии отдельных ядерных частиц (ОЯЧ) или при импульсном ионизирующем воздействии (ИИВ). Версия 1.0». Номер свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ 2014662253