

На правах рукописи

**Шунков Валерий Евгеньевич**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КМОП МИКРОСХЕМ,  
ВЫПОЛНЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ «КРЕМНИЙ НА  
ИЗОЛЯТОРЕ» С ПРОЕКТНЫМИ НОРМАМИ 0,5-0,35 МКМ, С  
ПОВЫШЕННОЙ СТОЙКОСТЬЮ К ВОЗДЕЙСТВИЮ  
ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ**

05.13.05 – «Элементы и устройства вычислительной техники  
и систем управления»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Соискатель:



МОСКВА – 2012 г.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Научно-исследовательском институте системных исследований Российской академии наук и в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Научный руководитель:

кандидат технических наук Осипенко Павел Николаевич

Научный консультант:

доктор технических наук Зебрев Геннадий Иванович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук Шелепин Николай Алексеевич,  
заместитель генерального директора – главный  
конструктор ОАО «НИИМЭ и Микрон»

кандидат технических наук Харитонов Игорь  
Анатольевич, заместитель заведующего кафедрой  
электроники и наноэлектроники Московского института  
электроники и математики НИУ ВШЭ

Ведущая организация:

ОАО «Корпорация «Комета»

Защита состоится 24 декабря 2012 г. в 16-00 в конференц-зале К-608 на заседании диссертационного совета Д 212.130.02 НИЯУ МИФИ по адресу 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан 22 ноября 2012 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре, заверенном печатью организации, по адресу НИЯУ «МИФИ».

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.т.н., профессор



П.К. Скоробогатов

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ**

### **Актуальность диссертации**

В настоящее время продукция микроэлектронной промышленности широко используется в отраслях, требующих от оборудования надежной работы в условиях воздействия ионизирующего излучения. Основные факторы, определяющие чувствительность КМОП микроэлектронных к воздействию ионизирующих излучений, – полная поглощенная доза и эффекты, связанные с воздействием отдельных ядерных частиц (ОЯЧ). Переход на глубоко субмикронные технологии повысил важность одиночных эффектов по сравнению; типичная пороговая линейная передача энергии (ЛПЭ) сбоев элементов глубоко субмикронных КМОП технологий составляет 1-5 МэВ/(мг/см<sup>2</sup>), что приводит к возникновению сбоев от альфа-частиц и более тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ).

Разработка библиотек элементов ИМС и сложнофункциональных блоков с повышенной стойкостью к внешним воздействующим факторам требует наличия встраиваемых в стандартный маршрут проектирования инструментов, позволяющих на этапе проектирования оценивать и повышать устойчивость элементов ИМС к воздействию ТЗЧ и проектировать сбоеустойчивые элементы ИМС на базе коммерческих технологий. Одним из перспективных коммерческих решений для комплексного обеспечения радиационной стойкости микроэлектронных приборов является технология «кремний на изоляторе» (КНИ). В КНИ отсутствует тиристорный эффект, что позволяет повысить отказоустойчивость и упростить конструкцию элементов ИМС.

Повышение сбоеустойчивости элементов частично обедненной КНИ КМОП технологии осложняется наличием паразитного биполярного эффекта, приводящего к умножению индуцированного ТЗЧ импульса тока. Применение контактов к телу транзистора не позволяет полностью подавить этот эффект, что делает актуальной задачу моделирования влияния паразитного биполярного эффекта на КНИ МОП транзисторы с контактами к телу и разработки конструктивно-топологических методов повышения сбоеустойчивости элементов ИМС, выполненных на КНИ КМОП технологии с применением транзисторов с контактами к телу.

### **Состояние вопроса**

Основные направления в исследованиях по тематике представленной диссертации – защита элементов ИМС от одиночных сбоев, моделирование элементов ИМС, радиационностойкое проектирование. Вклад в исследования по тематике диссертации внесли работы таких зарубежных ученых, как J. Schwank, L.

Massengill, P. Dodd, V. Ferlet-Cavrois, M. Baze, K. Hirose. В России наиболее значимые работы принадлежат А.И. Чумакову, В.В. Емельянову, Г.И. Зебреву, К.О. Петросянцу, И.А. Харитонову, Ю.М. Герасимову, В.Я. Стенину.

**Цель диссертации** заключается в разработке и развитии методов и средств уменьшения интенсивности одиночных сбоев, вызванных воздействием тяжелых заряженных частиц на элементы ИМС, выполненных по частично обедненной КНИ КМОП технологии с проектными нормами 0,5-0,35 мкм.

Для достижения поставленной цели решались **основные задачи**:

- 1) Разработка математической модели воздействия ТЗЧ на КНИ МОП транзистор, учитывающей влияние паразитного биполярного эффекта на радиационный отклик транзистора с контактом к телу.
- 2) Разработка метода повышения сбоеустойчивости элементов КНИ КМОП ИМС при помощи радиационноориентированной оптимизации параметров.
- 3) Разработка блока статической памяти с повышенной устойчивостью к воздействию ТЗЧ с использованием предложенного метода повышения сбоеустойчивости и модели воздействия ТЗЧ на КНИ МОП транзистор.

#### **Научная новизна**

- 1) Показана значимость перехода от независимого повышения пороговой ЛПЭ и снижения сечения насыщения сбоев к решению комплексной задачи уменьшения интенсивности сбоев на орбите космического аппарата.
- 2) Предложен метод повышения сбоеустойчивости элементов КНИ КМОП ИМС при помощи радиационноориентированной оптимизации параметров.

#### **Практическая значимость диссертации**

- 1) Расчетным образом установлена и экспериментально подтверждена необходимость учета влияния паразитного биполярного эффекта на сбоеустойчивость элементов КНИ КМОП ИМС, выполненных на транзисторах с контактом к телу. Предложены рекомендации разработчикам сложнофункциональных блоков, применение рекомендаций позволило спроектировать по технологиям КНИ КМОП с проектными нормами 0,5 мкм и 0,35 мкм библиотеку элементов и сложнофункциональные блоки с повышенной стойкостью к внешним воздействующим факторам.
- 2) Разработан, изготовлен и испытан блок статической памяти. Результаты испытаний показывают рост пороговой ЛПЭ сбоев с 8-9 МэВ/(мг/см<sup>2</sup>) до 13-14 МэВ/(мг/см<sup>2</sup>). Результаты моделирования показывают, что применение разработанного запоминающего элемента позволяет обеспечить уменьшение интенсивности

одиночных сбоев, вызванных воздействием ТЗЧ, с  $1,5 \cdot 10^{-8}$  до  $4,7 \cdot 10^{-9}$  сбоев/(бит·день) на геостационарной орбите и с  $7,6 \cdot 10^{-10}$  до  $2,3 \cdot 10^{-10}$  сбоев/(бит·день) на орбите МКС.

3) Разработанные метод и математическая модель интегрированы в стандартный маршрут проектирования ИМС и использованы при разработке библиотеки стандартных элементов по технологии КНИ КМОП с проектными нормами 0,35 мкм и сложнофункциональных блоков микропроцессоров на КНИ КМОП технологии с проектными нормами 0,5 и 0,35 мкм («КОМДИВ-32Р», «РЕЗЕРВ-32»).

#### **Основные положения диссертации, выносимые на защиту**

1) Сечение насыщения одиночных сбоев в статическом ОЗУ, выполненном по частично обедненной КНИ КМОП технологии с проектными нормами 0,5-0,35 мкм, соответствует сумме площадей затворов и стоков транзисторов, чувствительных к воздействию ТЗЧ.

2) Необходимость подавления паразитного биполярного эффекта накладывает дополнительные ограничения на правила проектирования топологии и расположение контактов к телу в частично обедненных КНИ МОП транзисторах.

3) Разработанный метод повышения сбоеустойчивости элементов КНИ КМОП ИМС к воздействию ТЗЧ, основанный на расчете критического заряда и интенсивности сбоев в реальных условиях и позволяющий обеспечить требуемые уровни сбоеустойчивости при проектировании ИМС.

4) Разработанная математическая модель воздействия ТЗЧ на КНИ МОП транзистор с контактом к телу, учитывающая влияние паразитного биполярного эффекта и позволяющая оценивать влияние параметров транзисторов на сбоеустойчивость элементов ИМС.

5) Разработанный маршрут проектирования, модифицированный для повышения сбоеустойчивости элементов ИМС в процессе разработки.

#### **Личный вклад соискателя**

Личный вклад соискателя в проведенные исследования состоит в подтверждении необходимости учета влияния паразитного биполярного эффекта на сбоеустойчивость элементов КНИ КМОП ИМС, выполненных на транзисторах с контактом к телу, разработке метода повышения сбоеустойчивости элементов ИМС, выработке рекомендаций для разработчиков сложнофункциональных блоков и разработке маршрута проектирования ИМС. Вклад соискателя в экспериментальную часть работы состоит в разработке тестовых структур и сложнофункциональных блоков, подготовке требований к исследуемым блокам и анализе результатов испытаний.

**Экспериментальные данные**, приведенные в диссертации, были получены в рамках НИР и ОКР совместно со специалистами НИИСИ

РАН, ФГУП «НИИ Приборов», ОАО «НИИ Космического приборостроения», ОАО «ЭНПО «СПЭЛС» и НИЯУ МИФИ.

### **Связь работы с крупными научными программами и темами**

Работа проводилась в НИИСИ РАН в рамках следующих государственных отраслевых научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ:

- 1) Проведение исследовательских испытаний тестовых структур с повышенной стойкостью к специальным воздействующим факторам (НИР «Аналитика»).
- 2) Разработка СБИС сбоеустойчивого микропроцессора с повышенной стойкостью к специальным внешним воздействиям «КОМДИВ32-Р» (ОКР «Квартал») по 0,5 мкм КНИ КМОП технологии.
- 3) Разработка 64-разрядного микропроцессорного комплекта с повышенной радиационной стойкостью (ОКР «Стойкость»).
- 4) Разработка «системы на кристалле» для построения резервируемых отказоустойчивых вычислительных систем с повышенной стойкостью к специальным внешним воздействиям и повышенной температуре «РЕЗЕРВ-32» (ОКР «Перга-СК») по 0,35 мкм КНИ КМОП технологии.

### **Апробация результатов диссертации**

Основные результаты, полученные в ходе работы над диссертацией, докладывались на ежегодных Научных сессиях МИФИ; ежегодных всероссийских конференциях «Радиационная стойкость» (Лыткарино); Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов (Зеленоград); Международной конференции «International Conference on Micro- and Nanoelectronics» (ICMNE); Международной конференции «Radiation Effects on Components and Systems (RADECS)».

### **Опубликованные результаты**

По теме диссертации опубликованы три статьи в научно-технических журналах из перечня ведущих периодических изданий ВАК: «Вопросы Атомной Науки и Техники» (ВАНТ), «Программные продукты и системы», «Proceedings of SPIE»; девять тезисов докладов в сборниках российских и международных научных конференций.

### **Структура и объем диссертации**

Работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка терминов и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 122 страницы. Диссертация содержит 58 рисунков и 13 таблиц. Список литературы содержит 120 пунктов.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Введение

Во введении обоснована актуальность темы, определена цель диссертации. Сформулированы задачи исследования и основные положения, выносимые на защиту. Изложены научная новизна и практическая значимость диссертации.

### Раздел 1. Сбоеустойчивость элементов технологии КНИ КМОП

Характерной особенностью технологии КНИ является полная электрическая изоляция отдельных элементов, что приводит к невозможности возникновения тиристорного эффекта («защелки»), являющегося одной из основных проблем обеспечения стойкости элементов ИМС к воздействию ионизирующего излучения. С точки зрения остальных факторов радиационной стойкости, КНИ не имеет существенных преимуществ перед объемной технологией. Например, несмотря на меньший чувствительный объем и сечение насыщения, сечение одиночных сбоев в реальных условиях у коммерческих КНИ КМОП схем больше, чем у объемных аналогов. Причина этого явления – паразитный биполярный эффект, существенно снижающий пороговую ЛПЭ сбоев.

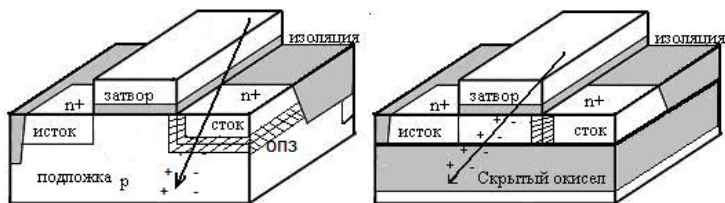


Рисунок 1 – Сечение и чувствительные объемы транзисторов, выполненных по объемной технологии и по технологии КНИ

Применение схемотехнических и конструктивно-топологических методов повышения стойкости приборов на базе технологии КНИ позволяет реализовать ее потенциальные преимущества и минимизировать недостатки. Современные глубоко субмикронные технологии позволяют обеспечить уровни дозовой стойкости, достаточные для многих применений, что, в сочетании с меньшей, чем у серийных решений, ценой и возможностью разработки в соответствии с требованиями заказчика, делает проектирование заказных спецстойких ИМС на базе коммерческих технологий перспективным направлением развития спецстойкой микроэлектроники.

## **Раздел 2. Моделирование одиночных событий в элементах КНИ КМОП технологии**

Основной механизм воздействия ТЗЧ на элементы ИМС – образование электронно-дырочных пар в результате первичной (для тяжелых ионов) или вторичной (для протонов и нейтронов) ионизации. В результате разделения образующихся при прохождении ТЗЧ через «плавающее» тело транзистора электронно-дырочные пар на выходе транзистора появляется импульс тока, способный привести к сбоям в функционировании схемы.

При накоплении неосновных носителей заряда в теле транзистора может возникать паразитный биполярный эффект, выражающийся в открывании истокового рп-перехода и включении паразитной биполярной структуры при повышении потенциала тела. Биполярная структура усиливает индуцированный ТЗЧ импульс тока (являющийся базовым для паразитного транзистора) и, таким образом, снижает эффективный критический заряд сбоя и пороговую ЛПЭ сбоя. Паразитный биполярный эффект проявляется не только в транзисторах с «плавающим» телом, но и с контактом к телу, так как сопротивление контакта к телу может составлять единицы или десятки кОм. Наличие контакта к телу позволяет уменьшить влияние паразитного биполярного эффекта, но не подавляет его полностью, в связи с чем необходимы учет влияния паразитного биполярного эффекта и выработка дополнительных ограничений на топологическое исполнение транзисторов, позволяющих обеспечить расстояния между контактами в транзисторе, достаточные для подавления эффекта.

Два основных подхода к моделированию взаимодействия МОП транзистора с ТЗЧ и паразитного биполярного эффекта – это использование технологического САПР или работа со встроенными средствами схмотехнических САПР. Основным достоинством технологического САПР является высокая точность моделирования и возможность проверки влияния вариаций технологии на поведение структуры. Главные недостатки применения технологических САПР – большая ресурсоемкость, избыточная точность и недоступность для разработчика необходимых сведений о технологическом процессе. При моделировании в схмотехническом САПР необходимо наличие моделей паразитных структур или учета их влияния в модели МОП-транзистора. Однако параметры, отвечающие за работу паразитной биполярной структуры, имеющиеся в модели BSIMSOI, обычно не извлекаются или извлекаются формально, так как считается, что применение контактов к телу позволяет полностью подавить кинк-эффект, являющийся основным проявлением биполярной структуры в штатных режимах работы транзистора с контактом к телу.



Соискателем была разработана простая математическая модель, представляющая собой реализацию предложенной в работах L. Massengill эквивалентной схемы (см. рисунок 2) в виде уравнения баланса токов в теле пораженного транзистора. L. Massengill предложил реализацию эквивалентной схемы в виде макромоделли, включающей в себя стандартные модели МОП-транзистора и биполярного транзистора, для которых проводится удаления пересекающихся параметров. Данная процедура подходит для низкоуровневых моделей МОП-транзисторов, но невозможна для моделей типа BSIMSOI, так как фактически требует полной реконструкции параметров (предлагаемой в работах Петросянца и Харитоновна). Основное отличие представленной модели от ранее известных работ состоит в том, что эквивалентная схема реализуется не в виде макромоделли, а как внешняя по отношению к схемотехническому САПР модель.

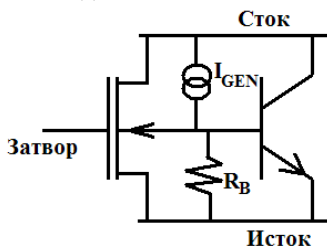


Рисунок 2 – Эквивалентная схема, использованная в модели

Пораженный транзистор представляется в виде эквивалентной схемы (см. рисунок 2), содержащей паразитную биполярную структуру, сопротивление тела транзистора и источник тока  $I_{gen}$ , моделирующий воздействие ТЗЧ. Входные параметры модели – параметры индуцированного ТЗЧ импульса тока, емкость тела транзистора, сопротивление контактов к телу, параметры паразитного биполярного транзистора; выходные параметры – напряжение на теле транзистора и выходной импульс тока на стоке транзистора.

Использование внешней математической модели позволяет обойти сложности с изменением параметров сложной модели МОПТ, уменьшить затраты времени и аппаратных ресурсов по сравнению с технологическим моделированием, и встроить исследование сбоеустойчивости элементов ИМС в стандартный маршрут проектирования.

Основная задача моделирования – преобразование индуцированного ТЗЧ импульса тока в импульс тока, возникающий на выходе пораженного транзистора в результате воздействия ТЗЧ.

Основные допущения, принятые в модели:

1) потенциал стока транзистора считается постоянным, так как изменение потенциала коллектора во время быстрого переходного процесса не оказывает значительного влияния на биполярную структуру;

2) эффективность эмиттера принята равной единице, так как условия рекомбинации на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub> неизвестны. При необходимости модель может быть дополнена параметрами поверхностной рекомбинации.

Решается дифференциальное уравнение (1) относительно переменной  $V_B(t)$  – потенциала тела транзистора:

$$C_{body} \frac{dV_B}{dt} = I_{gen}(t) - \frac{V_B(t)}{R_{bt}} - I_B(V_B). \quad (1)$$

Здесь  $I_{gen}$  – ток, индуцированный попаданием ТЗЧ (источник тока на рисунке 2),  $V_B/R_{bt}$  – ток через резистор заземления,  $I_B(V_B)$  – ток базы паразитного биполярного транзистора,  $C_{body}$  – эффективная емкость тела транзистора.

Расчитанная зависимость  $V_B(t)$  используется для моделирования коллекторного тока паразитного биполярного транзистора  $I_C(t)$ , который представляет собой ток на выходе пораженного МОПТ – усиленный импульс тока, индуцированный ТЗЧ, и используется для схематического моделирования исследуемой схемы. Параметры простой модели паразитного биполярного транзистора могут быть получены при помощи моделирования структуры в САПР или из эксперимента.

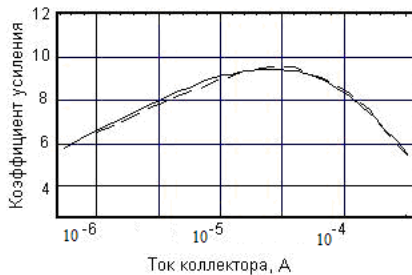


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента усиления паразитного npn-транзистора от тока коллектора

Характерные величины максимума коэффициента усиления паразитных БТ, полученные при измерении тестовых структур по КНИ КМОП технологии с проектными нормами 0,5 мкм составили 8-15 для npn-транзисторов и 4-7 для pnp-транзисторов (рисунок 3).

Разработанная модель применима для любых частично обедненных КНИ КМОП технологий, что ограничивает актуальные проектные

нормы на уровне 150-130 нм, так как при меньших проектных нормах используется полностью обедненная технология, в которой управление потенциалом тела производится без контакта.

На рисунке 4 показано смоделированное соотношение инжектированного ТЗЧ и полного заряда для разных сопротивлений контакта. Видно, что уменьшение сопротивления контакта полностью подавляет биполярный эффект при малых индуцированных зарядах и уменьшает его влияние при больших.

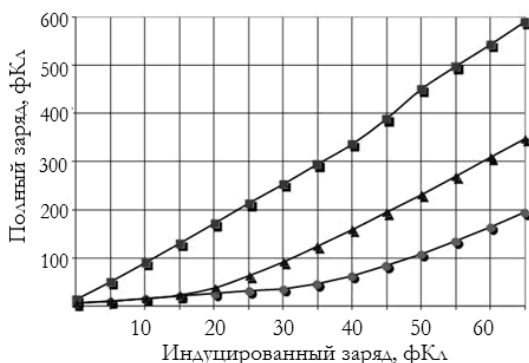


Рисунок 4 – Смоделированное соотношение инжектированного и умноженного заряда при разных сопротивлениях контакта (квадраты – без контакта, треугольники – сопротивление 10 кОм, круги – сопротивление 5 кОм).

Для транзисторов с размерами, близкими к минимальным, для подавления паразитного биполярного эффекта может хватить одного контакта, однако применение двух контактов (см. рисунок 5) позволяет существенно повысить устойчивость транзисторов к полной поглощенной дозе за счет уменьшения краевых токов утечки.

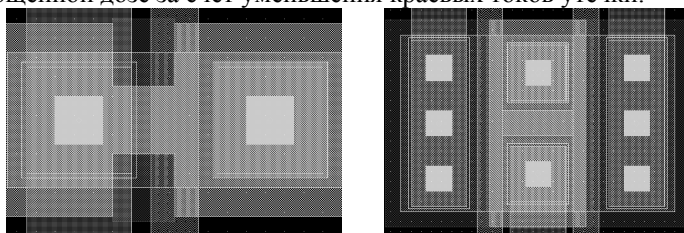


Рисунок 5 – Топология транзисторов А- и Н-типа с двусторонними контактами к телу (НИИСИ, технология КНИ КМОП 0,5 мкм, 2009)

Для комплексного повышения устойчивости элементов и сложнофункциональных блоков КНИ КМОП ИМС как к одиночным событиям, так и к полной поглощенной дозе были разработаны рекомендации по проектированию, учитывающие необходимость

применения транзисторов с контактом к телу и обеспечения сопротивления контакта к телу, достаточно малого для подавления паразитного биполярного эффекта. Применение рекомендаций позволило разработать библиотеку базовых элементов на КНИ КМОП технологии с проектными нормами 0,35 мкм и ряд сложнофункциональных блоков для разработанных в НИИСИ РАН микропроцессорах и системах на кристалле («КОМДИВ-32Р», «РЕЗЕРВ-32»).

### **Раздел 3. Метод повышения сбоеустойчивости элементов КНИ КМОП ИМС**

Для решения задачи повышения сбоеустойчивости элементов КНИ КМОП ИМС соискателем был предложен метод радиационноориентированной оптимизации схемотехнических параметров. Задача оптимизации сформулирована как подбор параметров элемента ИМС, обеспечивающих минимальную интенсивность одиночных сбоев в заданных условиях, с учетом дополнительных ограничений, задаваемых функциональными параметрами элемента ИМС. Это отличает метод от аналогов, в которых происходит оптимизация с целью увеличения пороговой ЛПЭ сбоев либо критического заряда.

Предлагаемый метод состоит в следующем:

1) Анализ защищаемой схемы и выделение наиболее уязвимых транзисторов. В случае комбинационных схем также необходима выработка критерия сбоя и учет влияния логического состояния схемы на чувствительные элементы.

2) Расчет чувствительности критического заряда сбоя схемы к параметрам схемы, выделение параметров, чувствительность критического заряда сбоя к изменению которых наибольшая.

3) Учет конструктивных и функциональных ограничений, задание пределов изменения оптимизируемых параметров.

4) Подбор параметров элемента ИМС, обеспечивающих минимальную интенсивность одиночных сбоев. Осуществляется при помощи комбинации схемотехнического моделирования и моделирования интенсивности сбоев в CREME96 или аналоге (OCOT, Spenvis).

Моделирование взаимодействия ТЗЧ с пораженным транзистором при помощи простой математической модели позволяет учесть влияние паразитного биполярного эффекта, сопротивления контакта и других параметров транзистора без значительных затрат времени и аппаратных ресурсов.

Основные параметры, на которые может влиять разработчик, не имеющий возможности корректировать технологию производства – размеры транзисторов, рабочие токи, сопротивления и емкости узлов

схемы, а также схемотехника элемента. В качестве ограничивающих функциональных параметров обычно выступают энергопотребление элемента, его площадь и быстродействие. Потенциально меняющиеся параметры, на которые разработчик не может влиять (например, изменение длительности фронта импульса тока, индуцированного ТЗЧ), рассматриваются как дополнительные параметры для моделирования наихудшего случая.

На рисунке 7 показаны зависимости критического заряда сбоя в шеститранзисторной бистабильной ячейке при попадании в транзисторы различных типов от соотношения ширины транзисторов. Наибольший критический заряд сбоя схемы достигается при соотношении ширины, соответствующем равной крутизне транзисторов обоих типов проводимости. Применение элементов памяти с выравниванием крутизны, таким образом, позволяет увеличить критический заряд сбоя на 30-50 процентов при сохранении суммарной ширины транзисторов.

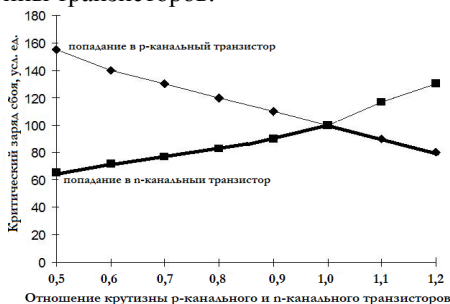


Рисунок 7 – Зависимости критического заряда при попадании в различные транзисторы от ширины р- и n-канальных транзисторов в ячейке памяти. Ромбы – попадание в р-канальный транзистор, квадраты – в n-канальный

Предложенный метод повышения сбоеустойчивости может применяться для защиты не только запоминающих элементов, но и комбинационных схем. Так как при переходных процессах не происходит статического перехода в другое логическое состояние, необходима выработка критерия сбоя, в роли которого может выступать переход выходного сигнала через половину питания, переключение эталонной нагрузки, прохождение сигнала через определенное число вентилях и т.д. Основное требование к критерию сбоя – применимость для всех элементов библиотеки.

На рисунке 8 показаны результаты моделирования распространения переходного процесса по цепочке инверторов разного размера. Видно, что увеличение выходного тока инверторов при помощи увеличения размеров выходных транзисторов позволяет

подавить сквозное прохождение одиночных сбоев с заданным индуцированным зарядом.

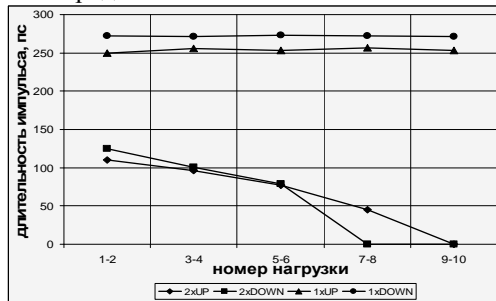


Рисунок 8 – Промоделированная длительность переходного процесса при распространении сбоя через каскад КНИ КМОП инверторов. 1xUP и 1xDOWN – каскад инверторов единичной силы, 2xUP и 2xDOWN – каскад инверторов двойной силы

Предложенный метод повышения сбоеустойчивости был внедрен в маршрут проектирования КНИ КМОП ИМС и сложнофункциональных блоков с повышенной стойкостью к специальным воздействующим факторам. Оптимизация параметров при помощи предложенного метода проводится как дополнительный этап схемотехнического проектирования блока и, повторно, после проектирования топологии и экстракции паразитных элементов.

Для проверки эффективности предложенного метода оптимизации параметров соискателем был разработан запоминающий элемент на базе КНИ КМОП технологии с проектными нормами 0,5 мкм (см. рисунок 9), а также разработан, изготовлен и испытан массив статической памяти 1Кx16 для испытаний в составе специализированного тестового кристалла.

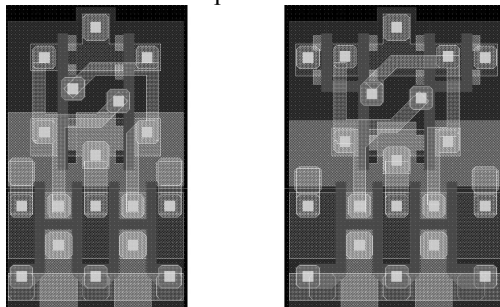


Рисунок 9 – Топология стандартной ячейки памяти (слева) и ячейки памяти, разработанной соискателем с учетом предложенного метода оптимизации параметров

Для повышения критического заряда сбоя было выполнено выравнивание крутизны транзисторов обоих типов проводимости. При этом ширина n-канальных транзисторов была уменьшена

относительно исходного запоминающего элемента, ширина р-канальных – увеличена. В связи с большим удельным сопротивлением тела для подавления паразитного биполярного эффекта потребовалось выполнение р-канальных транзисторов в виде двухпальцевых структур. Рост площади разработанного запоминающего элемента составил 27%. Моделирование показало, что критический заряд сбоя у оптимизированной ячейки на 50% больше, чем у стандартной.

#### **Раздел 4. Экспериментальное исследование эффективности метода повышения сбоеустойчивости элементов КНИ КМОП технологии**

Для испытаний СБИС на воздействие ТЗЧ используются три основных метода:

- 1) испытания на моделирующих установках с изотопными источниками;
- 2) испытания с использованием лазерных имитаторов;
- 3) испытания с использованием ускорителей ионов.

Все три метода имеют свои достоинства и недостатки, однако для полноценного изучения сбоеустойчивости ИМС необходимо комбинированное применение всех трех методов и наличие методики пересчета и сравнения данных полученных на установках разных типов. Представленные в данной работе экспериментальные данные были получены на изотопном источнике и ускорителе ионов, имеющих такой же физический механизм, так у реального воздействия. Применение лазерных имитаторов в современных технологиях с многослойной металлизацией на данный момент нуждается в дополнительном изучении.

На рисунке 10 показано сравнение результатов, полученных на ускорителе заряженных частиц и на осколках деления калифорния при испытаниях кэш-памяти микропроцессора, выполненного по 0,5 мкм КНИ КМОП технологии. Результаты, полученные разными методами, хорошо согласуются между собой, что позволяет сделать вывод о целесообразности использования источников на осколках деления калифорния для исследования сбоеустойчивости элементов КНИ КМОП ИМС при малых ЛПЭ, в том числе для определения пороговой ЛПЭ сбоев.

На рисунке 10 показано влияние угла падения ТЗЧ на результаты испытаний при малых ЛПЭ. Три лежащие рядом точки с эффективным ЛПЭ 6,8, 9,6 и 13,6 МэВ/(мг/см<sup>2</sup>) – результаты облучения неонем с углами 0°, 45° и 60°, лежащая на кривой точка с ЛПЭ 16 МэВ/(мг/см<sup>2</sup>) – результат облучения аргоном с нормальным падением. Возникновение плоской части сечения сбоев может быть вызвано некорректным расчетом эффективной ЛПЭ из-за влияния ориентации ИМС относительно потока падающих частиц. Из литературы известно

наличие зависимости сечения сбоев от азимута угла попадания ТЗЧ в микросхемы с большими регулярными структурами. Уточнение влияния угла падения на эффективную ЛПЭ и выработка корректной методики пересчета являются важными задачами, решение которых необходимо для уточнения корреляции между экспериментальными результатами, полученными разными методами.

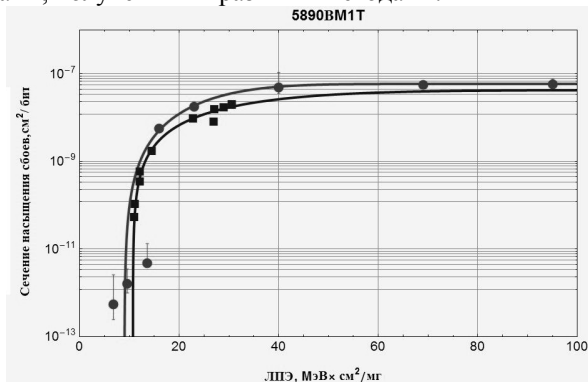


Рисунок 10 – Сравнение результатов испытаний на ускорителе (●) и на осколках деления калифорния (■)

В ходе нескольких серий испытаний сбоеустойчивости исследовались специализированные тестовые кристаллы статической памяти и макетные и опытные образцы микропроцессоров, выполненных по КНИ КМОП технологиям с проектными нормами 0,5 и 0,35 мкм (см. таблицы 1 и 2). В состав тестовых кристаллов входили блоки статической памяти с разными типами запоминающих элементов (в том числе разработанные с применением предложенного метода оптимизации параметров), у микропроцессоров исследовалась сбоеустойчивость кэш-памяти. Сравнительные испытания образцов микропроцессоров, выполненных на КНИ с «плавающим» и заземленным телом, на устойчивость к воздействию полной поглощенной дозы и к одиночным сбоям подтвердили эффективность применения двусторонних контактов к телу.

Таблица 1 – Результаты сравнительных испытаний 0,5 мкм КНИ процессоров

	КНИ с «плавающим» телом	КНИ с заземленным телом
Сечение сбоев при ЛПЭ 30, $\times 10^{-7}$ см <sup>2</sup> /бит	1	1,5
Пороговая ЛПЭ, МэВ см <sup>2</sup> /мг	<1,5	7



Основными целями испытаний тестового кристалла по технологии КНИ с проектными нормами 0,5 мкм были:

1) сравнение сбоеустойчивости четырех вариантов памяти: стандартной, с выравниванием крутизны, с активной RC-цепью и DICE;

2) подтверждение повышения пороговой ЛПЭ шеститранзисторной памяти с контактами к телу.

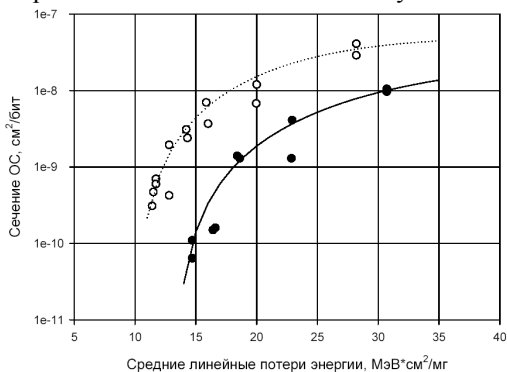


Рисунок 11 – Экспериментальные зависимости сечения одиночных сбоев от средних линейных потерь энергии в тестовом кристалле по 0,5 мкм технологии. Белые круги и пунктирная линия показывают стандартную шеститранзисторную память, черные круги и черная линия показывают разработанный соискателем блок памяти с оптимизированными параметрами транзисторов.

На рисунке 11 показаны зависимости сечения сбоев от ЛПЭ для стандартной шеститранзисторной ячейки памяти и разработанной соискателем ячейки с выравниванием крутизны транзисторов. Оптимизированная ячейка памяти имеет пороговую ЛПЭ сбоев 13-14 МэВ см²/мг, что существенно превышает значение 8-9 МэВ см²/мг, полученное для стандартной ячейки памяти. Сечение одиночных сбоев в разработанной соискателем памяти при малых ЛПЭ, характерных для условий космического пространства, в 2-5 раз меньше, чем у аналогичной незащищенной памяти. В приведенном эксперименте не было достигнуто сечение насыщения сбоев, что объясняет меньшее сечение сбоев при максимальной приведенной ЛПЭ.

В проведенном эксперименте не было зафиксировано сбоев в ячейках памяти типа DICE и ячейках с активной RC-цепью, что позволяет сделать следующие выводы:

1) В блоках памяти с ячейками типа DICE и ячейками с активными RC-цепями не зафиксировано ни одного сбоя, то есть пороговая ЛПЭ сбоев в этих типах памяти превышает 25 МэВ/(мг/см²), максимально достижимую на имеющейся изотопном источнике.

2) Пороговая ЛПЭ сбоев в ячейке памяти с выравниванием крутизны транзисторов на 35% больше, чем у стандартной шеститранзисторной ячейки памяти.

В состав тестового кристалла, выполненного по КНИ КМОП технологии с проектными нормами 0,35 мкм, были включены пять блоков памяти с разными типами запоминающих элементов: DICE, с активными RC-цепями, с выравниванием крутизны транзисторов, а также два типа стандартной шеститранзисторной ячейки с металлическими и диффузионными перемычками между транзисторами доступа и транзисторами ячейки (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты испытаний одного из тестовых кристаллов по КНИ КМОП технологии с проектными нормами 0,35 мкм.

Давление в камере установки, мм рт. ст.	Поток, $\text{част}/\text{см}^2$	Число ошибок в блоках				
		Выровненная крутизна	Активные RC-цепи	DICE	Диффузионные перемычки	Металлические перемычки
459	$3,67 \cdot 10^6$	0	0	0	0	1
380	$3,64 \cdot 10^6$	0	0	0	15	11
303	$3,78 \cdot 10^6$	7	0	0	67	77
152	$3,69 \cdot 10^6$	137	0	0	326	331
76	$3,58 \cdot 10^6$	265	0	0	525	548
38	$3,77 \cdot 10^6$	359	0	0	697	669
$\leq 4$	$3,54 \cdot 10^6$	452	0	0	816	824

Цели испытаний:

1) Подтверждение эффективности различных методов повышения сбоеустойчивости при переходе с проектных норм 0,5 мкм на проектные нормы 0,35 мкм.

2) Сравнение сечения сбоев в шеститранзисторных ячейках с разной площадью стоков транзисторов.

На основе анализа экспериментальных данных были сделаны следующие выводы:

1) Подтверждена эффективность применяемых методов повышения сбоеустойчивости при переходе от проектных норм 0,5 мкм к проектным нормам 0,35 мкм, в том числе применения транзисторов с двусторонними контактами к телу, запоминающих элементов DICE, с активными RC-цепями и с выравниванием крутизны транзисторов.

2) Пороговое значение ЛПЭ ячейки памяти с выравниванием крутизны p- и r-канальных транзисторов превышает аналогичный показатель стандартной памяти на 30-35%.

3) Сечения сбоев в шеститранзисторных ячейках памяти с металлическими и диффузионными перемычками не различаются и, при больших ЛПЭ, превышают площадь подзатворных областей.

При малых ЛПЭ чувствительным объемом в КНИ является подзатворная область (подверженная воздействию паразитного биполярного эффекта), однако исследования подтверждают возможность сбоев при попадании в сток транзистора (механизм, аналогичный объемной технологии) при больших ЛПЭ. В рамках исследования микропроцессора, выполненного по КНИ КМОП технологии с проектными нормами 0,5 мкм, была проведена экспериментальная оценка верхнего предела сечения насыщения одиночных сбоев в ячейках кэш-памяти (таблица 3).

Таблица 3 – Сравнение площадей топологических областей с экспериментальными значениями сечений насыщения (в см<sup>2</sup>)

Наименование области транзистора / тип экспериментальных результатов	Площадь области / сечение сбоев
Подзатворная область	1,55 10 <sup>-8</sup>
Сток	4,03 10 <sup>-8</sup>
Сток с диффузией ключевого транзистора	6,29 10 <sup>-8</sup>
Половина подзатворной области и сток	4,81 10 <sup>-8</sup>
Подзатворная область и сток	5,58 10 <sup>-8</sup>
Подзатворная область и сток с диффузией ключевого транзистора	7,84 10 <sup>-8</sup>
Максимальное сечение сбоев, полученное на ускорителе	7,69 10 <sup>-8</sup>

Из топологии ячеек памяти были рассчитаны значения площадей потенциально чувствительных областей. Из таблицы 3 видно, что максимальное сечение сбоев, полученное на ускорителе, приблизительно совпадает с полной площадью стоков и затворов уязвимых транзисторов. Это подтверждает наличие нескольких разных механизмов сбоя при больших ЛПЭ и позволяет оценить сечение насыщения одиночных сбоев.

С помощью программы CREME96 были рассчитаны спектры ЛПЭ падающих ТЗЧ (таблица 4) на геостационарной орбите и на орбите Международной космической станции (МКС), а также соответствующие им интенсивности одиночных сбоев в блоке статической памяти с обычными шеститранзисторными запоминающими элементами и в разработанном соискателем блоке статической памяти с выравниванием крутизны транзисторов (оба блока были выполнены по технологии КНИ с проектными нормами 0,5 мкм).

Таблица 4 – Полученные из экспериментальных данных параметры функции Вейбулла для двух блоков памяти и интенсивность одиночных сбоев на геостационарной орбите (GEO) и орбите МКС (ISS)

	$L_0, \text{МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$	$W, \text{МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$	S	$\sigma_0, \text{см}^2$	GEO, сбоев/(бит·день)	ISS, сбоев/(бит·день)
6Т память	6,7	30	2,1	$6,4 \cdot 10^{-8}$	$1,53 \cdot 10^{-8}$	$7,61 \cdot 10^{-10}$
Выравнивание крутизны	14,1	120	1,2	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$4,68 \cdot 10^{-9}$	$2,31 \cdot 10^{-10}$

В таблице 4 показаны рассчитанные параметры функции Вейбулла для двух типов запоминающих элементов и интенсивности сбоев на двух орбитах. Видно, что применение разработанных соискателем запоминающих элементов с выравниванием крутизны транзисторов позволило уменьшить интенсивность одиночных сбоев приблизительно в три раза, как на геостационарной орбите, так и на орбите МКС. Этого результата удалось добиться, несмотря на вызванное конструктивными ограничениями увеличение сечения насыщения сбоев. Таким образом, можно говорить не только об увеличении пороговой ЛПЭ сбоев, но и об успешном переходе от независимого снижения сечения насыщения сбоев и повышения пороговой ЛПЭ к решению комплексной задачи повышения сбоеустойчивости блока памяти в условиях воздействия ионизирующего излучения космического пространства.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Основной результат представленной диссертации состоит в создании метода повышения сбоеустойчивости элементов КНИ КМОП ИМС с проектными нормами 0,5 и 0,35 мкм и его использовании для повышения сбоеустойчивости микропроцессоров и систем на кристалле, разработанных в НИИСИ РАН.

#### Основной научный теоретический результат

Разработана математическая модель воздействия ТЗЧ на частично обедненный КНИ МОП транзистор, учитывающая влияние паразитного биполярного эффекта на транзистор с контактом к телу. Разработан метод повышения сбоеустойчивости элементов КНИ КМОП ИМС при помощи радиационноориентированной оптимизации параметров. Разработанный метод позволяет повысить сбоеустойчивость элементов КНИ КМОП ИМС и снизить интенсивность одиночных сбоев при сохранении приемлемых функциональных параметров прибора и применении стандартной схемотехники.

#### Основные практические результаты

1) Показано, что сечение насыщения сбоев в запоминающих элементах, выполненных по частично обедненной КНИ КМОП

технологии с проектными нормами 0,5-0,35 мкм, соответствует полной площади стоков и затворов транзисторов, чувствительных к попаданию ТЗЧ, что позволило упростить прогнозирование интенсивности одиночных сбоев.

2) Предложены рекомендации разработчикам, учитывающие дополнительные ограничения на топологию транзисторов, накладываемые необходимостью подавления паразитного биполярного эффекта. Применение рекомендаций позволило повысить радиационную стойкость библиотек элементов и сложнофункциональных блоков, разработанных в НИИСИ РАН на технологиях КНИ КМОП с проектными нормами 0,5 и 0,35 мкм.

3) При помощи предложенного метода разработан, изготовлен и испытан запоминающий элемент и блок статической памяти на его основе. Результаты экспериментальных исследований показывают, что применение разработанного соискателем метода оптимизации позволило повысить пороговую ЛПЭ шеститранзисторной ячейки статической памяти на 50%, что соответствует уменьшению частоты одиночных сбоев на геостационарной орбите и на орбите МКС в три раза ( $4,7 \cdot 10^{-9}$  против  $1,53 \cdot 10^{-8}$  сбоев на бит в день для геостационарной орбиты и  $2,31 \cdot 10^{-10}$  против  $7,61 \cdot 10^{-10}$  сбоев на бит в день для орбиты МКС).

4) Разработан модифицированный маршрут проектирования, применение которого позволило спроектировать на базе технологий КНИ с проектными нормами 0,5 мкм и 0,35 мкм библиотеки стандартных элементов и сложнофункциональные блоки с повышенной стойкостью к воздействию ТЗЧ, примененные в разработанных в НИИСИ микропроцессорах и системах на кристалле с повышенной стойкостью к специальным внешним воздействиям («КОМДИВ-32Р», «РЕЗЕРВ-32»).

### **Список работ, опубликованных по теме диссертации**

#### Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1) Шунков В.Е. Оптимизация параметров элементов интегральных микросхем для защиты от одиночных сбоев. // Программные продукты и системы, № 4(96) 2011, стр. 24-26, Москва, 2011.

2) Шунков В.Е., Горбунов М.С., Долотов П.С., Зуев А.Л., Осипенко П.Н. Радиационно-ориентированная оптимизация параметров ячейки статической памяти. // Вопросы атомной науки и техники, серия «Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру», выпуск 1, стр. 62-66, Москва, 2009.

3) V.E. Shunkov, M.S. Gorbunov, G.I. Zebrev, B.V. Vasilegin, "Parasitic Bipolar Effect in Modern SOI CMOS Technologies," Proceedings of the SPIE, Volume 7025, pp. 702516-702516-8, 2008.

### Статьи и материалы конференций

- 1) Шунков В.Е., Долотов П.С., Василегин Б.В., Емельянов В.В., Озеров А.И., Каменский М.В., Осипенко П.Н. Оценка сбоеустойчивости ИМС на базе 0,35 мкм КНИ КМОП технологии при воздействии тяжелых заряженных частиц // «Стойкость-2010», материалы конференции, 2010.
- 2) Шунков В.Е., Гагарин Е.А. Оптимизация стойкости ячейки статической КМОП памяти к воздействию одиночных заряженных частиц // «Микроэлектроника и информатика-2006: тезисы докладов», 2006.
- 3) Е.А. Гагарин, В.Е. Шунков, Г.И. Зебрев, Исследование влияния схемотехнических параметров статической КМОП-ячейки памяти на стойкость к воздействию одиночных частиц ионизирующих излучений // «Научная сессия МИФИ-2006. Сборник научных трудов», Том 1, 2006.
- 4) В.Е. Шунков, Г.И. Зебрев, Моделирование паразитного биполярного эффекта в КНИ МОП транзисторах // «Научная сессия МИФИ-2007. Сборник научных трудов», Том 1, 2007.
- 5) М.С. Горбунов, В.Е. Шунков, В.Н. Ильягуев, П.Н. Осипенко, Разработка радиационно-стойких аналоговых схем на «цифровой» КНИ КМОП технологии. // «Научная сессия МИФИ-2007. Сборник научных трудов», том 1, Москва, 2007.
- 6) Г.И. Зебрев, В.Е. Шунков, Е.А. Гагарин, П.Н. Осипенко, Б.В. Василегин, Компьютерное моделирование стойкости статических КМОП ячеек памяти объемных и КНИ-технологий к воздействию одиночных частиц. // Радиационная стойкость электронных систем "СТОЙКОСТЬ-2006" Научно-технический сборник.
- 7) Ю.И. Бочаров, А.С. Гуменюк, А.Б. Симаков, М.С. Горбунов, В.Е. Шунков, А.В. Поляков, Анализ методов построения и разработка КМОП БИС аналого-цифровой многоканальной "системы-на-кристалле". // «Научная сессия МИФИ-2007. Сборник научных трудов», том 1, Москва, 2007.
- 8) G.I. Zebrev, M.S. Gorbunov, V.E. Shunkov, E.A. Gagarin, A.V. Khakhaev, V.S. Pershenkov, P.N. Osipenko, B.V. Vasilegin, A.Y. Nikiforov, A.V. Sogoyan, Physical Modeling and Circuit Simulation of Hardness of SOI Transistors and Circuits for Space Applications // RADECS-2006.
- 9) V. Shunkov, P. Osipenko, E. Atkin, Radiation-hardened design for STS on SOI technology // CBM Collaboration meeting, Dubna, 2008.