

На правах рукописи

ЗЕБРЕВ ГЕННАДИЙ ИВАНОВИЧ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОЗОВЫХ И ОДИНОЧНЫХ
РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В КРЕМНИЕВЫХ МИКРО-
И НАНОЭЛЕКТРОННЫХ СТРУКТУРАХ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ**

05.27.01 - Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,
микро- и нанoeлектроника на квантовых эффектах

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Автор:

Москва – 2009 г.

Работа выполнена в Московском инженерно-физическом институте
(Национальном исследовательском ядерном университете)

Официальные оппоненты: д. т.н., профессор, акад. Орликовский А.А.
д. т. н., профессор, Петросянц К.О.
д. ф.м. н., Зинченко В.Ф.

Ведущая организация

ФГУП НИИ КП

Защита состоится 23 ноября 2009 г. в на заседании диссертационного совета Д212.130.02 при Московском инженерно-физическом институте (Национальном исследовательском ядерном университете) по адресу 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ.

Автореферат разослан «__» _____ 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор

Скоробогатов П. К.

Актуальность диссертации

Современная микроэлектроника является наиболее быстроразвивающейся отраслью промышленности и лежит в основе информационных технологий, автоматизации и средств управления, космических и оборонных систем. Разработка перспективных приборов нанoeлектроники (понимаемой здесь как микроэлектроника с проектными нормами менее 100 нм) и обеспечение надежного функционирования уже существующих микроэлектронных компонентов и интегральных микросхем (ИМС) является необходимым элементом инновационного развития и обеспечения стратегической безопасности государства. Основу современной микроэлектронной индустрии составляет кремниевые КМОП технологии, доминирующие в цифровой технике и биполярные технологии, остающиеся основными в аналоговых схемах. Широкое использование этих технологий в промышленности (атомные электростанции), космических и военных системах, работающих в условиях внешних ионизирующих излучений (ИИ), делает актуальными задачи моделирования деградации их характеристик и нарушений работоспособности под воздействием постоянного и импульсного ИИ, а также отдельных частиц высокоэнергетического космического излучения.

Можно выделить несколько фундаментальных задач радиационной стойкости, характерных для компонентов и интегральных схем современной микроэлектроники:

- радиационно-индуцированные токи утечки в приборах КМОП технологий;
- эффекты усиления деградации при низкоинтенсивном облучении в приборах биполярной технологии;
- одиночные радиационные эффекты обратимого и необратимого характера, связанные с воздействием высокоэнергетических частиц космического пространства;
- эффекты радиационно-индуцированной защелки (паразитного тиристорного эффекта), являющиеся одной из главных проблем обеспечения стойкости современных КМОП технологий.

Моделированию этих эффектов посвящен основной материал предлагаемой диссертации. В силу сложности объекта моделирование должно носить многоуровневый характер и базироваться, по крайней мере, на физическом и схемотехническом уровне описания. Физический уровень мо-

делирования описывает процессы деградации в материалах, структурах и приборах, поставляя выходные данные, которые могут использоваться как входные параметры для схемотехнического моделирования, в т.ч. с использованием стандартных систем автоматического проектирования.

Моделирование радиационных эффектов в интегральных микросхемах неотделимо от развития методов физического моделирования работы приборов и от всестороннего и комплексного исследования процессов деградации с целью развития методов предсказания радиационной стойкости и проектирования перспективных радиационно-стойких микроэлектронных компонентов и, с практической точки зрения, является одной из самых актуальных задач современных нанотехнологий.

Связь диссертации с крупными научными программами

В последние годы работа проводилась в Московском инженерно-физическом институте (Национальном исследовательском ядерном университете) в рамках следующих государственных отраслевых и научно-исследовательских работ:

- 1) программы Международного научно-технического центра (проекты 1003 и 0451);
- 2) федеральной целевой научно-технической программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники гражданского назначения» в рамках подпрограммы «Перспективная элементная база микроэлектроники».
- 3) создание испытательного стенда на базе ускорителя ИТЭФ для испытаний микроэлектронных компонентов на воздействие одиночных частиц (протонов и тяжелых заряженных частиц), проводимых под эгидой Роскосмоса.
- 4) Разработка радиационно-стойких ИМС по технологии «кремний-на-изоляторе» с проектной нормой 0.5 и 0.35 мкм, проводимых в НИИСИ РАН в рамках отраслевой НИР «Аналитика».
- 5) Создание методики парирования аномальной работы передатчиков бортовой аппаратуры служебного канала управления спутника связи ЯМАЛ-100.

Цель диссертации заключается в разработке методов физического и схемотехнического моделирования работы приборов и устройств современных КМОП и биполярных технологий для описания поведения их характеристик в условиях воздействия ИИ разной мощности дозы для различных температур и электрических режимов, с последующим использованием результатов моделирования для разработки методик прогнозирования их радиационной стойкости и проектирования перспективной радиационно-стойкой элементной базы.

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

- Развитие предложенной автором усовершенствованной физической модели МОП транзистора на случай КНИ технологий с полностью и частично обедненным телом, с двойным затвором, а также на случай баллистического переноса носителей в канале, характерного для перспективных нанoeлектронных технологий.
- Моделирование процессов радиационно-индуцированного накопления и релаксации захваченного заряда в подзатворных окислах и толстых слоях боковой и донной изоляции STI и LOCOS типа современных МОП транзисторов КНИ и объемных технологий и его релаксации в ходе облучения и отжига как функции дозы, мощности дозы, температуры и электрического режима.
- Разработка физических и схемотехнических методов расчета радиационно-индуцированных краевых и донных токов утечки, обусловленных захваченным зарядом в толстых слоях краевой изоляции, которые являются основным механизмом деградации в современных МОП транзисторах с ультратонкими подзатворными окислами (2...10 нм).
- Развитие физической количественной модели аномального эффекта низкой интенсивности (т.н. Enhanced Low Dose Rate Sensitivity, ELDRS) в толстых полевых окислах (главным образом, приборов биполярной технологии) и метода прогнозирования этого эффекта.
- Развитие методов физических и схемотехнических расчетов одионных радиационных эффектов (ОРЭ), вызванных воздействием отдельных частиц (протонов, нейтронов, тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ)) и приводящих к обратимым сбоям (переключениям ячейки памяти) и необ-

ратимым отказам типа защелки (т.е. паразитному тиристорному эффекту, вызванному отдельной ионизирующей частицей).

- Разработка методов и программы расчета интенсивности сбоев в цифровых элементах памяти под воздействием космического излучения (протоны, ТЗЧ) с учетом спектра космических частиц и параметров чувствительности ИМС, полученных в ходе наземных испытаний.

Научная новизна диссертации заключается в многоуровневом подходе к моделированию радиационных эффектов в элементах и ИМС, начиная от физического моделирования процессов в материалах, приборах и приборных структурах с передачей информации для моделирования схемных эффектов на схемотехническом уровне. При этом были получены следующие новые научные результаты:

1. Предложенная ранее диффузионно-дрейфовая компактная модель МОП транзистора, основанная на явном решении уравнения непрерывности тока в канале и способная непрерывным образом описывать в аналитической форме вольтамперные характеристики (ВАХ) транзисторов во всех режимах работы, обобщена для современных приборов современных технологий «кремний-на-изоляторе» (КНИ) с полным и частичным обеднением, а также перспективных приборов объемной интеграции (транзисторы с двойным затвором). Модель позволяет описывать переход от случая диффузного переноса к случаю баллистического (бесстолкновительного) переноса, специфического для транзисторов с наноразмерными длинами каналов.

2. Разработана количественная модель радиационно-индуцированных краевых токов утечки из-за накопления зарядов в толстых слоях боковой изоляции STI типа, являющихся основным дозовым эффектом деградации в современных ИМС высокой степени интеграции. Впервые показано, что ограничение накопления заряда и токов утечки с увеличением толщины окисла осуществляется за счет зарядовой нейтрализации дефектов радиационно-индуцированными электронами, известный как RICN эффект. Предложена основанная на физической модели процедура экстракции SPICE параметров паразитных транзисторов эквивалентной схемы для автоматизированного расчета токов утечки с помощью современных САПР.

3. Впервые разработана аналитическая количественная модель известного эффекта усиления деградации при низкой интенсивности. Пока-

зано, что этот эффект определяется не конкретными механизмами деградации приборов (которые могут быть разными для разных технологий), а эффективностью выхода (разделения) радиационно-индуцированного заряда в толстых слоях изоляции. Наличие или отсутствие таких эффектов определяется температурой, толщиной слоя изоляции и величиной электрического поля в окисле вне зависимости от технологии.

4. Исследованы стохастические эффекты энерговыделения, накопления зарядов в окисле, а также сбоев связанные с неоднородным характером ионизации от воздействия отдельных частиц (протонов и тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) космического излучения, а также вторичных атмосферных нейтронов).

5. Разработаны методы схемотехнического расчета параметров чувствительности статических ячеек памяти КМОП технологии при воздействии отдельных ТЗЧ и импульсного облучения.

6. Разработаны общие физико-математические подходы к расчету скорости сбоев от отдельных ионизирующих частиц для заданных спектров излучений космического пространства.

7. Исследованы схемотехнические методы моделирования радиационно-индуцированной защелки от воздействия отдельной частицы космического пространства. Предложен количественный подход к моделированию окон защелки при воздействии импульсного ионизирующего излучения.

Практическая значимость диссертации заключается в следующем:

1. Физическая модель радиационно-индуцированных краевых и донных токов утечки МОП транзисторов объемной и КНИ технологии, позволяет проводить детальные расчеты токов утечки, что позволило использовать модель в процессе оптимизации технологических параметров при проектировании радиационно-стойких элементов ИМС. Предложенная процедура определения SPICE параметров эквивалентных паразитных транзисторов позволяет передавать рассчитанные по физической модели константы для использования в стандартных системах схемотехнического проектирования типа SPECTRE CADENCE®.

2. Разработанная физическая модель аномального эффекта низкой интенсивности (ELDRS) в приборах биполярной технологии дает возможность установления количественной эквивалентности между длительным низкоинтенсивным облучением и кратковременного облучения с высокой

мощностью дозы в условиях повышенной температуры. Это открывает перспективы создания методики прогнозирования поведения параметров биполярных ИМС в условиях длительного низкоинтенсивного облучения космического пространства, основываясь на результатах лабораторных испытаний, что является одной из важнейших задач обеспечения радиационной стойкости и длительного срока активного существования микроэлектронных систем бортовой аппаратуры космических аппаратов.

3. Установленные механизмы и разработанные модели деградации позволяют сформулировать практические рекомендации для проведения ускоренных испытаний с целью адекватного прогнозирования долговременной радиационной стойкости и надежности элементов биполярных и КМОП технологий.

4. Разработанные методы расчета интенсивности одиночных сбоев, методики испытаний и обработки экспериментальных данных, а также соответствующие компьютерные программы, легли в основу программного комплекса ОСОТ, который предполагается основным расчетным средством для создаваемого под эгидой НИИКП и Роскосмоса испытательного центра на базе ускорителя ИТЭФ РАН для проведения испытаний изделий полупроводниковой электроники (ИПЭ) на воздействие одиночных протонов и ТЗЧ.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Развитие разработанной автором ранее диффузионно-дрейфовой физической модели МОП транзисторов на случай современных КНИ технологий полностью и частично обедненного типа, баллистического переноса и перспективных конфигураций объемной интеграции типа транзистора с двойным затвором.

2. Модель накопления и релаксации (отжига) радиационно-индуцированного заряда в толстых окислах боковой изоляции типа STI и дозовых зависимостей краевых и донных токов утечки.

3. Метод определения параметров SPICE параметров паразитных эквивалентных транзисторов для расчета радиационно-индуцированных токов утечки на схемном уровне с помощью схемотехнических САПР.

4. Количественная модель аномального эффекта низкой интенсивности в биполярных приборах. Вывод о том, этот эффект определяется не конкретными механизмами деградации приборов (которые могут быть

разными для разных технологий), а эффективностью выхода (разделения) радиационно-индуцированного заряда в толстых слоях изоляции.

5. Модель совместного учета эффектов усиления выхода радиационного заряда и туннельного отжига захваченного заряда при снижении интенсивности ИИ, которая позволила объяснить слабовыраженный характер, либо отсутствие зависимости от мощности дозы токов утечки.

6. Метод расчета интенсивности сбоев в элементах памяти изделий полупроводниковой электроники, от космического пространства с учетом ЛПЭ спектров космических ТЗЧ солнечного и галактического происхождения для различных орбит и защит космических аппаратов.

7. Метод схмотехнического моделирования радиационно-индуцированной защелки в КМОП микросхемах при воздействии одионных тяжелых ионов или импульсного излучения, позволяющий описать эффект «окон» защелки при импульсном облучении как следствие просадки локального напряжения на шинах питания.

Апробация результатов. Основные результаты диссертации докладывались на ежегодных Научных сессиях МИФИ (1999-2008); ежегодных всероссийских конференциях "Радиационная стойкость" (Лыткарино); Всероссийской конференции «Многомасштабное моделирование процессов и структур в нанотехнологиях» (ММПЧН-2008); Международных конференциях в Молдове (1997, 2002), Румынии (1998); Международной конференции "International Conference on Micro- and Nanoelectronics" (ICMNE, 2001-2002, 2005, 2007), среди них 2 устных доклада; Европейской конференции по микроэлектронике MIEL (2000, 2002, 2004, 2006, 2008) (1 устный доклад); ежегодных американских конференциях IEEE NSREC (1996, 2000-2002); ежегодных Европейских конференциях RADECS (1995, 1999, 2001-2003, 2005, 2006, 2008, 2009).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 статей в российских научно-технических журналах, сертифицированных ВАК; 6 статей в международных журналах; 19 статей в рецензируемых научно-технических сборниках трудов международных конференций (Proceedings SPIE, MIEL, RADECS); ~ 20 тезисов докладов в сборниках российских научных конференций; главы в двух книгах (в т.ч. международного издательства); одна монография.

Личный вклад соискателя. Все теоретические результаты, модели, методы расчетов и интерпретации экспериментальных данных, приведенные в диссертации, получены и предложены лично соискателем. Компьютерные коды и расчеты разрабатывались и выполнялись совместно с учениками и аспирантами соискателя. Экспериментальные результаты, приведенные в диссертации, выполнены специалистами в сотрудничестве с НИИ приборов, СПЭЛС, НИИ системных исследований РАН, НИИ космического приборостроения, ИТЭФ. Вклад соавторов связан, главным образом, с обсуждением результатов и выполнением экспериментов.

Объем и структура диссертации. Работа состоит из введения, семи глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 155 страниц. Диссертация содержит 72 рисунка. Список литературы содержит 179 наименований.

Диссертация организована следующим образом. В главе 1 описаны предложенные ранее автором модели работы МОП транзисторов, развитые для случая приборов КНИ технологий и перспективных наноэлектронных конфигураций. Глава 2 посвящена описанию моделей радиационно-индуцированных токов утечки в боковых слоях изоляции транзисторов современных технологий. В главе 3 описывается количественная модель усиления деградации при низкой интенсивности ИИ. Глава 4 посвящена схемотехническому моделированию параметров чувствительности КМОП ячеек памяти к воздействию отдельных частиц космического пространства. В главе 5 приведено описание метода и программы расчета интенсивности сбоев от отдельных частиц космического пространства. В главе 6 описаны модели влияния нейтронов на сбои в микроэлектронных компонентах. Наконец, в главе 7 представлен схемотехнический подход для моделирования защелки в КМОП структурах при воздействии отдельных частиц и импульсного излучения.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Обеспечение радиационной стойкости микро(нано)электронных компонентов и систем, применяемых в космосе, бортовой авионике летательных аппаратов, системах вооружений, ядерной энергетике, физике высоких энергий, является многодисциплинарной областью, объединяющей в себе проблемы материаловедения, схемотехники, технологии, проектирования интегральных микросхем, испытаний и методов прогнозирования. Ключевым элементом, объединяющим исследования в различных областях применения, является моделирование. Проблема моделирования процессов деградации в элементах микроэлектроники, с необходимостью носит комплексный, многоуровневый характер. Это обусловлено тем, что процессы деградации затрагивают как процессы в материалах и в приборных структурах, требующих описания на физическом уровне, так и на уровне схемных элементов, описываемых методами схемотехнического моделирования. Поэтому, моделирование процессов деградации параметров микроэлектронных компонентов (в частности, транзисторов) трудно отделить от моделирования работы схемы в целом. Понимание механизмов и развитие совместных моделей процессов деградации и работы микроэлектронных компонентов является необходимым условием, как проектирования перспективной радиационно-стойкой элементной базы, так и создания методик прогнозирования радиационной стойкости существующих микроэлектронных систем в условиях воздействия внешних дестабилизирующих (в общем случае, неравновесных) факторов. Развитие технологии, а именно, - переход к субмикронным (с размерами < 0.5 мкм) и наноразмерным (< 0.1 мкм = 100нм) проектным нормам, - приводит к тому, что значимость разных механизмов деградации существенно меняется.

Например, в современных МОП транзисторах (даже не изготовленных по радиационно-стойкой технологии) с толщиной подзатворного окисла несколько нанометров, практически не происходит заметного накопления заряда и поверхностных состояний даже при облучении с дозами ~ 1 Мрд. Надпороговая вольтамперная характеристика (ВАХ) таких транзисторов практически не изменяется при таких дозах, а основной эффект дозовой деградации выражается в резком увеличении (на несколько порядков) подпороговых токов утечки. Радиационно-индуцированные токи утечки почти полностью вызываются зарядом, захваченным в толстых слоях оки-

слов боковой и донной изоляции современных МОП транзисторов объемной и КМОП технологии. Аналогично, дозовая деградация компонентов биполярной технологии, также обусловлена процессами генерации, переноса и накопления радиационного заряда в толстых (0.5...1 мкм) полевых окислах, перекрывающих переход эмиттер-база.

Вторым типом эффектов, роль которых резко возрастает для миниатюрных приборов в ИМС высокой степени интеграции, являются одиночные радиационные эффекты (ОРЭ), вызванные воздействием отдельных ТЗЧ, протонов или нейтронов космического или иного происхождения. Это обусловлено тем, что с уменьшением напряжения питания и емкостей узлов, помехоустойчивость цифровых и аналогово-цифровых элементов к воздействию внешних импульсных помех, в том числе и от отдельных частиц, вообще говоря, снижается.

Ситуация осложняется тем, что многие физические механизмы процессов деградации остаются до сих пор до конца невыясненными, а интерпретации экспериментальных данных - противоречивыми. В кандидатской диссертации [1] автором были поставлены и решены несколько задач:

- Моделирование радиационно-индуцированного накопления, туннельного и радиационно-стимулированного отжига заряда в подзатворном окисле.
- Разработанная кинетическая модель накопления и туннельной релаксации радиационно-индуцированных положительно заряженных дефектов в окисле дает возможность рассчитывать процессы накопления и отжига заряда в окисле и на границе раздела Si-SiO₂ при любом временном профиле мощности дозы.
- Параметры, полученные из экспериментов в лабораторных условиях, проведенных с мощностью дозы, обеспечивающей приемлемую продолжительность испытаний (например, ~200 рад(SiO₂)/с), могут быть использованы для прогнозирования радиационного отклика МОП приборов в космическом окружении с малыми мощностями дозы ионизирующего излучения ($<10^{-3}$ рад (SiO₂)/с).
- Выяснение доминирующего характера механизма влияния перезарядки поверхностных состояний на крутизну МОП транзисторов.
- Моделирование влияния неравновесных горячих носителей на деградацию характеристик и срок службы МОП транзисторов.

- Моделирование ВАХ короткоканальных МОП транзисторов с последовательным учетом влияния зависимости подвижности от величины тянущего электрического поля при аналитическом решении уравнения непрерывности тока в канале.
- Изучены теоретически взаимосвязанные проблемы экранирования и микроскопической подвижности носителей в канале за счет рассеяния на заряженных дефектах и шероховатостях границы раздела Si-SiO₂.

Полученные результаты отражены в работах [2-29].

Вместе с тем, в этой области остается ряд **нерешенных** крупных комплексных **проблем**, главными из которых являются:

- Проблема физического и схемотехнического моделирования радиационно-индуцированных токов утечки и, связанных с ними механизмов накопления и отжига захваченного заряда в толстых слоях краевой изоляции.
- Проблема выяснения качественного механизма и количественного моделирования аномального эффекта низкой интенсивности (ELDRS) в ИМС биполярной технологии.
- Проблема схемотехнического расчета параметров чувствительности цифровых ИМС к воздействию отдельных частиц и связанная с ней проблема расчета интенсивности одиночных сбоев в реальных условиях космического пространства, основываясь на результатах наземных испытаний.
- Проблема компактного моделирования работы современных транзисторов КНИ технологий и перспективных транзисторов с двойным затвором.

Исходя из этого, в рамках диссертационной работы решались следующие задачи:

1. Моделирование работы КНИ МОП транзисторов

В **главе 1** описана новая компактная модель МОП транзисторов КНИ технологий с частичным и полным обеднением, основанная на аналитическом решении уравнения непрерывности для плотности тока в канале транзистора [30, 31]. Эта модель является развитием диффузионно-дрейфовой модели МОП транзисторов объемной технологии, подробно описанной в работах [3, 4] и кандидатской диссертации автора [1]. При проектировании СБИС используется идеология компактного моделирова-

ния, основанная на простых математических моделях, содержание которых описывается набором расчетных формул. При этом важной стороной такого подхода является полнота и физическая содержательность используемых аналитических выражений. Несмотря на это, даже описание эффекта первого порядка (например, эффекта насыщения тока) остается в стандартных компактных моделях типа BSIM3-4 физически неудовлетворительным. Аналитическое описание области ВАХ, переходной от надпорогового к подпороговому режиму, а также от линейного участка к участку насыщения производится с помощью интерполяционных процедур. Это происходит потому, что модели BSIM основаны на приближениях, в которых отсутствует явное решение уравнения непрерывности для плотности тока в канале. Между тем, хорошо известно, что последовательный подход для получения ВАХ транзисторов требует решения уравнения непрерывности для тока в канале. Действительно, уравнение непрерывности для тока является неотъемлемой частью фундаментальной системы уравнений, включающей в себя также уравнение Пуассона, граничные условия и уравнения переноса носителей тока. Ключевая часть предложенного подхода состоит в том, что в явном виде получено аналитическое решение для уравнения непрерывности плотности тока в канале, что позволило получить в компактном виде замкнутые выражения для тока, а также распределения электрических полей, потенциалов и плотности носителей в канале при любом напряжении на затворе [30-32].

В результате было получено общее выражение для вольтамперной характеристики (ВАХ) МОП транзистора, справедливое для всех режимов его работы:

$$I_D = \frac{W}{L} D_0 q n_s \frac{1+\kappa}{\kappa} \left[1 - \exp \left(- \frac{\kappa}{1+\kappa} \frac{V_{DS}}{\varepsilon_D} \right) \right], \quad (1)$$

где n_s – плотность электронов в канале вблизи истока; D_0 – коэффициент диффузии электронов; q – заряд электрона; V_{DS} – напряжение между стоком и истоком; W/L – отношение ширины канала к его длине; $\varepsilon_D = q n_s / dn_s / d\varphi_s$ – энергия диффузии, равная энергии Ферми для вырожденных и тепловой энергии kT для невырожденных каналов. Показано, что формула (1) справедлива как для транзисторов объемных, так и КНИ технологий с частичным и полным обеднением. Разные технологии имеют разную электростатику, что выражается в разном виде формул

для управляющего параметра κ , равного отношению величины диффузионной компоненты тока к дрейфовой. Развита модель относится к классу моделей PSP (potential surface based), использующих поверхностный потенциал в качестве независимой переменной. Модели такого рода являются более физическими и рассматриваются как перспективная альтернатива подходам (типа BSIM), использующим в качестве независимой переменной напряжение на затворе. Все параметры формулы для тока (1) представляются явными функциями поверхностного потенциала φ_s , а вся сложная электростатическая конфигурация транзистора независимо описывается выражением для связи затворного напряжения и поверхностного потенциала $V_G(\varphi_s)$, получаемой при решении уравнения Пуассона. Такой подход позволяет выделить моделирование электростатики слоистой структуры транзистора в отдельную задачу и дает возможность рассчитывать единым образом различные конфигурации приборов. В частности, это позволило обобщить модель на случай КНИ транзисторов с частично и полностью обедненным телом. Эти модели использовались для предварительной экстракции параметров для стандартных SPICE моделей и расчетов радиационно-индуцированных токов утечки в схемах КМОП КНИ технологий 0.5 мкм, спроектированных в НИИСИ. Такой же подход дал возможность разработать модель транзистора с перспективной конфигурацией с двойным затвором (double gate transistor) [32]. Такая конфигурация является развитием полностью обедненной КНИ технологии с очень тонким кремниевым телом и симметричным нижним затвором за тонким окислом вместо толстого скрытого окисла. Транзисторы с двойным затвором рассматриваются в настоящее время как предельная конфигурация КМОП технологии, обеспечивающая максимально возможную степень интеграции с длиной канала 8...10 нм и толщиной кремниевого тела до 3 нм. Наконец, в диссертационной работе описано обобщение модели на случай баллистического переноса, реализующегося при условии, когда длина пробега носителей в канале l становится сопоставимой с длиной канала L . Полученные выражения для тока описывают плавный переход от случая диффузного переноса ($l \ll L$) к случаю баллистического транспорта ($l > L$).

Таким образом, предложенная модель позволяет единым образом описывать переходную область работы транзистора, где дрейфовый и диффузионные токи имеют одинаковый порядок величины. Модель воспроизво-

дид результаты стандартных моделей для отдельных режимов работы и имеет совместимый с ними набор параметров. Подробное описание моделей дано в монографии соискателя [33]. Квантовомеханические аспекты описания переноса в каналах нанoeлектронных структур представлены в работе [34]. Описанный подход может быть применен для разработки физической модели полевых транзисторов на основе графена, являющихся наиболее перспективным материалом для создания нанoeлектронных технологий новых поколений [35, 36].

2. Моделирование токов утечки в приборах КНИ КМОП технологий

В главе 2 рассматриваются радиационно-индуцированные краевые токи утечки, обусловленные накоплением заряда в боковой изоляции транзисторов, которые являются главной причиной дозовой деградации в современных схемах высокой степени интеграции. Для их моделирования был разработан многоуровневый подход на физическом и схемотехническом уровнях описания [37, 38, 39]. Ток через паразитный канал представлялся в виде суммы токов через большое количество элементарных паразитных транзисторов малой ширины, каждый из которых имеет свою толщину окисла, пороговое напряжение, накопленный заряд в окисле и т.п.

$$I_{par} V_{GS}, V_{DS} = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^N i V_{GS} - V_{T_{x_k}}, V_{DS} \Delta x, \quad (2)$$

где $i V_{GS} - V_{T_{x_k}}, V_{DS}$ рассчитывалось по компактной модели МОП транзистора [30, 31],

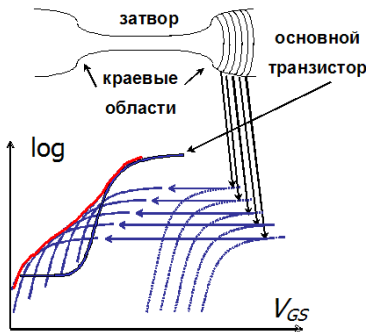


Рис.1. ВАХ паразитного краевого транзистора как сумма токов элементарных тран-

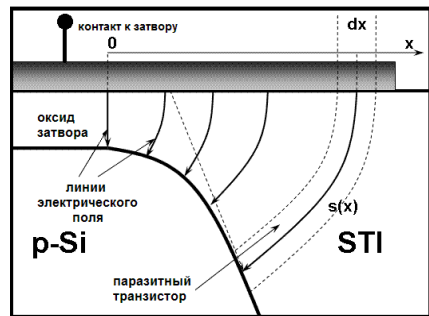


Рис.2. Схематическое представление области между тонким подзатворным окислом и кра-

V_{GS} , V_{DS} и $V_T(x_k)$ – напряжения на затворе, стоке и локальное значение порогового напряжения соответственно, Δx – ширина элементарного паразитного транзистора, N – число паразитных транзисторов (см. рис.1 и 2).

Пороговое напряжение рассчитывается для основного и каждого из паразитных транзисторов как функция эффективной длины силовой линии электрического поля, которая принята равной длине собирания радиационно-индуцированных дырок $s \times x$, форма которых определялась решением уравнения Лапласа в клине (см. рис. 2).

Принципиально новым моментом в моделировании был учет эффектов радиационно-стимулированного отжига (RICN), моделирование которого детально описано в кандидатской диссертации автора [1]. Для локальной плотности захваченного заряда $Q_{ot}(x, D)$ было получено выражение

$$Q_{ot}(x, D) = \frac{q F_t}{\sigma_n E_{ox}} \frac{s \times x}{\Delta x_{ecoll}} \times 1 - \exp \left[-\sigma_n E_{ox} \eta_{eff} E_{ox} K_g \Delta x_{ecoll} D \right], \quad (3)$$

D – доза, $K_g \cong 8 \times 10^{12} \text{ см}^{-3} \text{ рд}^{-1}(\text{SiO}_2)$, F_t – эффективность захвата дырок, σ_n – возрастающее с уменьшением поля сечение захвата электронов на положительно заряженные ловушки в окисле, Δx_{ecoll} – эффективная длина сбора электронов. Выход радиационного заряда $\eta_{eff}(E_{ox})$, лимитированный в сильных электрических полях в окисле E_{ox} (0.5...5 МВ/см) процессами родственной (geminate) рекомбинации, моделировался стандартным эмпирическим выражением

$$\eta_G \curvearrowright_{ox} \curvearrowleft \eta_0 + \frac{E_{ox}/E_0}{1 + E_{ox}/E_0} \curvearrowleft - \eta_0 \curvearrowright, \quad (4)$$

с подгончными константами $\eta_0 = 0.065$ и $E_0 = 0.15$ МВ/см. Для моделирования выхода заряда в относительно слабых полях (0.05...0.5 МВ/см) использовалась разработанная автором модель задержанной рекомбинации, характерной для толстых окислов (см. гл. 3). Плотность захваченного заряда в тонком окисле оказывается малой из-за ограниченной толщины сбора носителей, а в толстом, – за счет сильной компенсации радиационно-индуцированными электронами в слабых электрических полях. Таким образом, распределение захваченного заряда имеет выраженный пик на участке сопряжения тонкого подзатворного окисла и толстого окисла краевой изоляции. Это обстоятельство, с одной стороны, позволяет четко

определить SPICE параметры эквивалентного паразитного транзистора для последующего схемотехнического моделирования; с другой, – дает возможность избежать искусственного ограничения ширины области накопления захваченного заряда, характерного для существующих в мировой литературе подходов [37, 39].

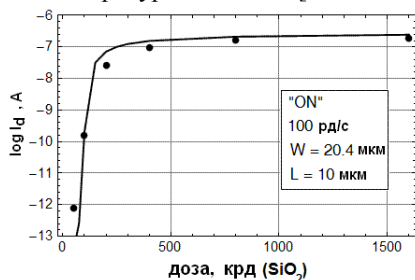


Рис.3 Экспериментальная (точки) и рассчитанная (линия) дозовая зависимость токов утечки ($F_i=0.1$ для подзатворного окисла, $F_i=0.52$ для STI, $\Delta x_{coll}=10$ nm)

На рис.3. представлено сравнение результатов численного моделирования тока утечки при $V_G = 0$ В с данными экспериментов по облучению КНИ транзисторов с краевой изоляцией STI типа. Насыщение обусловлено переходом паразитного транзистора в надпороговой режим. По результатам экспериментов по облучению тестовых транзисторных структур была проведена

экстракция радиационных параметров модели. Сравнение детального вида ВАХ тех же тестовых транзисторов для разных доз в диапазоне 0...1.6 Мрд (SiO_2) представлено на рис. 4-5.

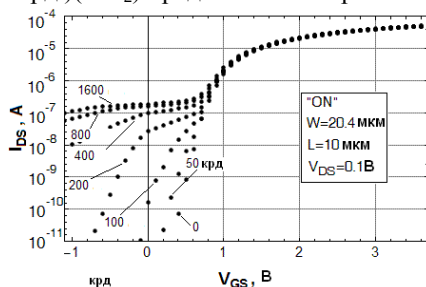


Рис.4. Экспериментальные вольтамперные характеристики тестовых транзисторов для разных доз облучения

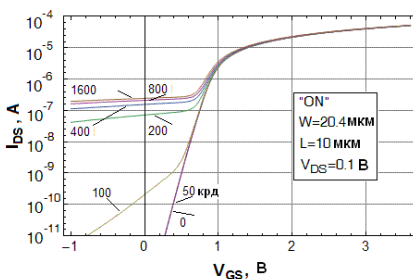


Рис.5. Расчетные вольтамперные характеристики тех же тестовых транзисторов

На рис.6 показана процедура извлечения SPICE параметров эквивалент-

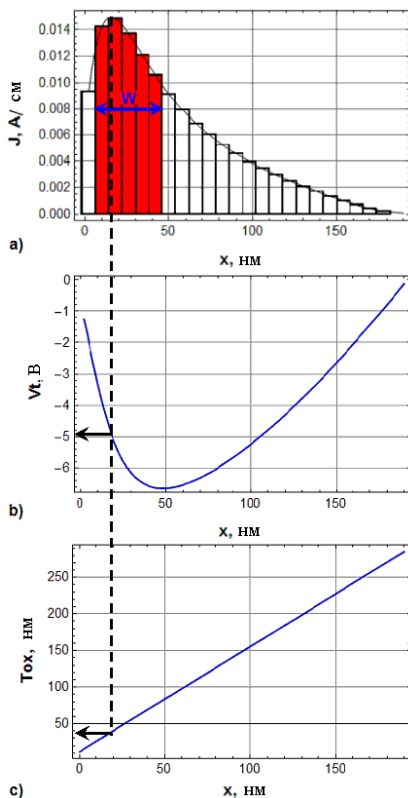


Рис. 6. Иллюстрация процедуры получения (a) эффективной ширины, (b) порогового напряжения и (c) толщины окисла эквивалентного паразитного транзистора

тного паразитного транзистора на физическом уровне моделирования для последующей передачи их в стандартный пакет типа Cadence Spectre.

На первом этапе получены распределения порогового напряжения и накопленного заряда. Эти данные используются на втором этапе для расчёта распределения плотности токов утечки $[A/cm]$ (рис. 6). Наличие выраженного максимума плотности токов утечки позволяет выделить параметры «оптимального» паразитного транзистора. Наибольший вклад в общий ток утечки дают паразитные транзисторы с токами, отличающиеся не более чем на 30% от максимального значения. Таким образом, эффективную ширину эквивалентного паразитного транзистора можно принять равной сумме ширин наиболее «эффективных» элементарных транзисторов.

Такой подход позволяет использовать физическое моделирование только для определения параметров эквивалентных паразитных транзисторов. На рис. 7 представлено сравнение результатов эксперимента с расчетом по физической модели и SPICE симуляторе SPECTRE.

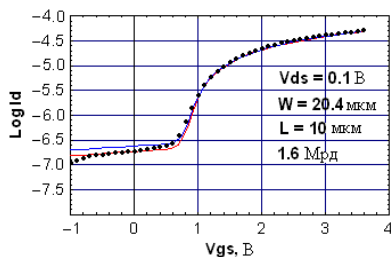


Рис. 7. Сравнение экспериментальных результатов (точки) и результатов физического (линия 1) и схемотехнического (линия 2) моделирования в SPICE симуляторе

В диссертационной работе рассмотрен также важный вопрос моделирования переходных токов утечки при импульсном воздействии ионизирующих излучений, которые могут приводить к временной потере работоспособности приборов. Релаксация токов имеет характерную степенную кинетику со временами восстановления до сотен секунд (см. рис. 8).

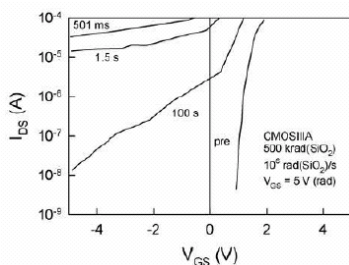


Рис.8. Экспериментальные ВАХ после импульсного облучения (Sandia, 2005)

Подобные подходы редко используются в мировой литературе, поскольку физическое моделирование производится в технологическом пакете TCAD, что очень затратно по времени, и, главное, не обеспечивает физически адекватного описания процессов накопления и отжига радиационного заряда в окисле.

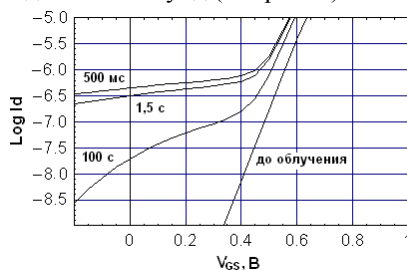


Рис.9. Расчетные ВАХ для разных времен после импульса

Как показано автором, степенная временная зависимость поведения токов утечки после импульса определяется логарифмической временной зависимостью т.н. туннельного отжига, моделирование которого в аспекте задач прогнозирования при низкоинтенсивном космическом облучении подробно рассматривалась в кандидатской диссертации [1]. Хорошая качественная корреляция расчетных и литературных экспериментальных данных показана на рис. 8 и 9.

3. Моделирование эффектов усиления деградации при низкоинтенсивном облучении

На протяжении почти 20 лет известно, что в приборах биполярной технологии (например, операционных усилителях) деградация при заданной дозе для низкоинтенсивного облучения (характерного для космического пространства) в несколько (до 10) раз больше, чем для случая относительно высоких интенсивностей ($\sim 1 \dots 300$ рд/с), используемых при испытаниях. Этот эффект усиления деградации при низкоинтенсивном облучении (общепринятый международный термин Enhanced Low Dose Rate Sensitivity, ELDRS) создает значительные проблемы при прогнозировании [40]. Относительно недавно эффекты ELDRS были обнаружены в приборах МОП технологии с толстыми окислами. В работах автора [39, 41-45] была разработана качественная и количественная модель, согласно которой эффекты ELDRS обусловлены рекомбинацией подвижных электронов и дырок, локализованных на мелких ловушках и/или хвостах плотности состояний аморфных материалов изоляторов. Согласно этой модели, все известные эффекты низкой интенсивности определяются не конкретными механизмами деградации приборов (которые могут быть разными для приборов разных технологий), а эффективностью выхода (разделения) радиационно-индуцированного заряда в толстых слоях изоляции. Таким образом, эффекты ELDRS можно рассматривать как дозиметрический эффект явной зависимости выхода заряда от мощности дозы вне зависимости от технологии (биполярная или КМОП) и конкретных механизмов деградации, специфичных для каждого типа приборов. Наличие или отсутствие таких эффектов определяется температурой облучения, толщиной слоя изоляции и величиной электрического поля в окисле $E_{ок}$. Точка зрения, что эффекты ELDRS обусловлены усилением рекомбинацией электронно-дырочных пар при повышении мощности дозы стала общепринятой только в самое последнее время (2008), но до сих пор разработанный автором подход является единственной количественной аналитической моделью.

Явная зависимость выхода заряда от интенсивности получается как аналитическое решение системы кинетических уравнений в квазистационарном приближении и представляется в явном виде [42]

$$\eta_{eff} P, T, t_{ox}, E_{ox} = \eta_G E_{ox} \frac{1 + 4f^{1/2} - 1}{2f}, \quad (5a)$$

$$f P, T, t_{ox}, E_{ox} \cong \frac{q t_{ox}^2}{6 \varepsilon_{ox} \varepsilon_0 \mu_h E_{ox}^2} \eta_G E_{ox} K_g P \exp\left(\frac{\varepsilon_p}{k_B T}\right), \quad (5b)$$

где P – мощность дозы, $\mu_h (\cong 10^{-6} \text{ см}^2 / \text{В с})$ подвижность дырок в SiO_2 , $\varepsilon_p (\cong 0.39 \text{ эВ})$ – эффективная энергетическая глубина ловушки.

На рис.10 показана рассчитанная зависимость значения нормированного эффективного выхода заряда η_{eff}/η_G как функция двух переменных: мощности дозы P и температуры облучения T (а), а также мощности дозы P и величины электрического поля в окисле E_{ox} при облучении (б).

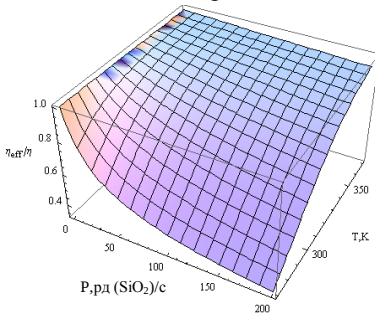


Рис. 10(а). Рассчитанный с помощью (5) нормированный выход заряда η_{eff}/η_G как двумерная функция мощности дозы и температуры облучения ($E_{ox} = 10^5 \text{ В/см}$)

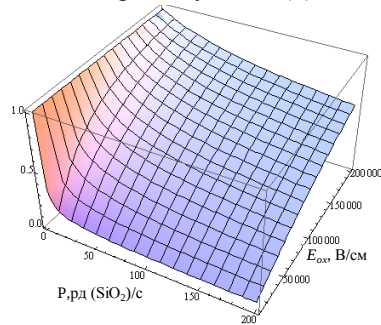


Рис. 10 (б). Рассчитанный выход заряда η_{eff}/η_G как функция мощности дозы и электрического поля в окисле ($T = 300 \text{ К}$, $\min E_{ox} = 10^4 \text{ В/см}$)

Результаты расчета, показанные на рис. 10(а) являются иллюстрацией того факта, что облучение при повышенной температуре является хорошим способом проведения ускоренных испытаний, имитирующих низкоинтенсивное облучение. Ситуация осложняется тем, что при увеличении температуры облучения имеет место конкуренция двух разнонаправленных процессов: (1) увеличения выхода зарядов и (2) термического отжига части рекомбинационных центров. Поэтому, в биполярных приборах высокоинтенсивное облучение ($\sim 100 \dots 300 \text{ рд/с}$) при повышенных температурах не всегда приводит к уровню деградации, эквивалентному воздействию излучений низкой интенсивности ($\ll 1 \text{ рд/с}$).

В диссертации описана модель рекомбинационных токов биполярных транзисторов при накоплении и отжиге рекомбинационных центров с двумя типами дефектов (6)

$$\Delta I_B = D, P = \eta_{eff} P, T d_{ox} A_j P \times \left(\tau_{a1} T \left(1 - \exp \left(- \frac{D}{P \tau_{a1} T} \right) \right) + \tau_{a2} T \left(1 - \exp \left(- \frac{D}{P \tau_{a2} T} \right) \right) \right). \quad (6)$$

Временные константы отжига $\tau_{a1(2)} = \tau_{a0} \exp(\varepsilon_{a1(2)}/k_B T)$ были получены из сравнения с экспериментами $\tau_{a0} \cong 10^{-7}$ с, $\varepsilon_{a1} \cong 0.8$ эВ, $\varepsilon_{a2} \cong 1.2$ эВ.

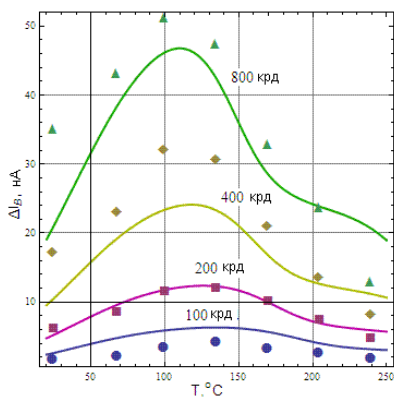


Рис.11. Сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей тока базы от температуры облучения для разных доз. Интенсивность облучения 294 рд(SiO₂)/с

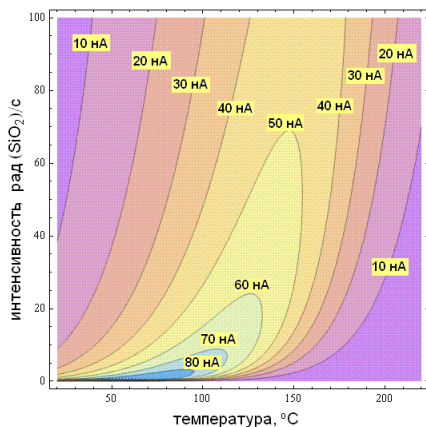


Рис.12. Рассчитанные кривые эквивалентной деградации для переменных «мощность дозы – температура облучения»

Оптимальное соотношение температур и интенсивности облучения зависит от конкретного изделия (и даже от контролируемого параметра), требуемой дозы облучения, выбранного коэффициента запаса, и может быть установлено только путем предварительных испытаний. Предложенный подход позволяет предсказать поведение транзистора при радиационном воздействии (рис. 11) и выбирать эквивалентные условия с разными параметрами «температура-доза» для ускоренных испытаний (рис. 12), что может служить основой для экспериментальной методики прогнозирования, что проиллюстрировано на рис. 12.

В диссертации разработана математическая модель совместного описания эффекта временного логарифмического отжига и эффекта усиления

выхода заряда при низкой интенсивности [39]. Экспериментально наблюдаются два вида зависимостей от мощности дозы. Во-первых, это временной эффект одновременного отжига (релаксации) накопленного радиационного заряда в окисле. Уменьшение интенсивности облучения для фиксированной дозы приводит к увеличению эффективного времени сопутствующего отжига и, соответственно, к уменьшению радиационного заряда в окисле. Этот эффект доминирует в тонких подзатворных окислах МОП транзисторов с высокими значениями характерных электрических полей. Во-вторых, имеет место истинный эффект мощности дозы, связанный с увеличением выхода радиационного заряда с уменьшением интенсивности, что характерно для приборов биполярных технологий с толстыми слоями изоляции и относительно низкими электрическими полями в них. Проведенные расчеты показали, что туннельный отжиг в значительной мере компенсирует аномальную зависимость от мощности дозы в боковой изоляции МОП транзисторов. Это объясняет тот факт, что аномальные эффекты интенсивности не проявляются, либо не очень выражены для радиационно-индуцированных токов утечки МОП транзисторов.

4. Моделирование одиночных радиационных эффектов

Проблема отказов элементов микроэлектроники, вызванных отдельными частицами спектра космических излучений, стала в последнее время доминирующей проблемой обеспечения надежности функционирования аппаратуры космических аппаратов.

Прогнозирование интенсивности отказов цифровых элементов, вызванных одиночными частицами космического спектра, является необходимым элементом обеспечения надежности аппаратуры космических аппаратов. С одной стороны, экспериментальное тестирование микросхем на одиночные радиационные эффекты является весьма дорогостоящим мероприятием, что обуславливает возрастающую роль расчетных методов. С другой стороны, расчетные методы сами по себе не обеспечивают полной достоверности прогнозирования. Прямой контроль стойкости электронной компонентной базы к одиночным радиационным эффектам в космическом пространстве предполагает использование ускорителей высокоэнергетических частиц. В настоящее время ведется работа по организации экспериментального центра на базе ускорителя ИТЭФ РАН для проведения испытаний изделий полупроводниковой электроники (ИПЭ) на воздействие одиночных протонов и ТЗЧ. Соискатель принимал непо-

средственное участие в разработке методического и программного обеспечения для этого центра [46-51].

Проблема прогнозирования интенсивности единичных сбоев имеет несколько аспектов. Стойкость цифровых элементов к воздействию одиночных частиц определяется технологическими и схемотехническими параметрами элементной базы. Радиационная стойкость по отношению к ОРЭ определяется помехоустойчивостью ячеек памяти и является по своей природе схемотехнической величиной. Это означает, что при наличии полной информации от изготовителя и/или проектировщика о схемотехнических характеристиках ячейки памяти параметры радиационной стойкости, - например, критический заряд ячейки памяти, - могут быть рассчитаны с помощью стандартных средств САПР. Значительная часть физико-технологических, электрических и топологических параметров явно закладывается при проектировании, но проблема состоит в том, что радиационная стойкость часто является функцией скрытых параметров, не контролируемых явным образом проектировщиком и изготовителем. Поэтому параметры чувствительности к радиационным эффектам (например, ОРЭ) не могут быть рассчитаны независимо от эксперимента даже при наличии полной технологической информации от изготовителя и проектировщика. На практике полная информация о схемотехнических параметрах либо отсутствует, либо носит весьма приблизительный характер. Поэтому для обеспечения достоверности прогнозирования необходимо привязывать расчетные результаты к опорным экспериментам.

Тем не менее, расчетные методы, во-первых, могут существенно сократить набор необходимых дорогостоящих экспериментов и тем самым удешевить и ускорить процедуры испытаний; во-вторых, оценку скорости сбоев в условиях космического пространства можно получить только расчетными методами, и, наконец, расчетные методы оценки параметров радиационной чувствительности незаменимы при проектировании радиационно-стойких ИМС.

На рис. 13 представлена блок-схема комплексной программы работ по прогнозированию интенсивности ОРЭ в космическом пространстве, включающая в себя: расчеты спектров космического излучения на заданных орбитах при заданной защите; экспериментальное определение параметров чувствительности к ОРЭ в ходе наземных испытаний; схемотехнические расчеты с привлечением данных от изготовителя и проектиров-

щика, расчет интенсивности сбоев в заданных условиях космического пространства.

Блок-схема расчета интенсивности сбоев

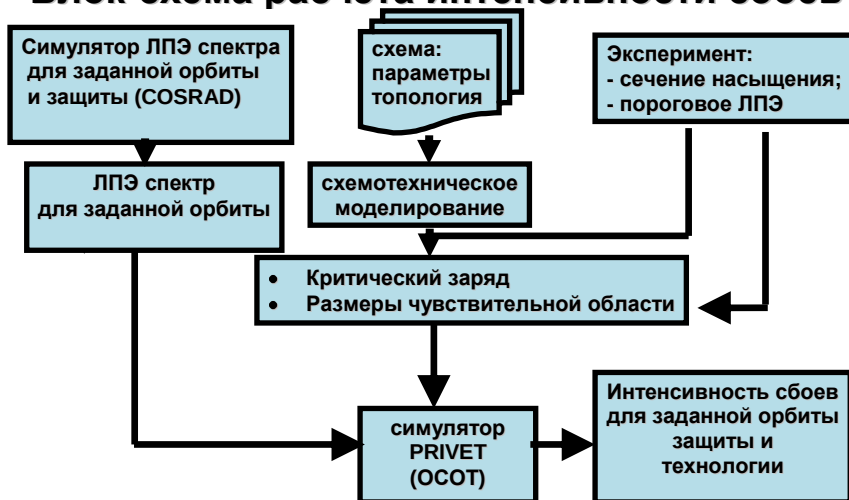


Рис.13. Блок схема расчета интенсивности сбоев в космическом пространстве

Частично эта программа реализуется в рамках широкой кооперации, организуемой под эгидой НИИКП и Роскосмоса, с участием ИТЭФ РАН и НИИП (экспериментальная установка и методика испытаний), НИИЯФ МГУ (расчет спектров космических излучений) и МИФИ (методики обработки результатов и программа расчета скорости сбоев, разработанные под руководством соискателя).

5. Схемотехническое моделирование параметров чувствительности ячеек памяти КМОП технологий

В главе 4 рассмотрены схемотехнические методы расчетов параметров чувствительности ячеек памяти к ОРЭ, дополняющие традиционные экспериментальные методы, использование которых часто затруднено по экономическим причинам. В частности, подробно описан метод эквивалентного генератора тока, имитирующего ионизационный импульс тока при прохождении отдельной ионизирующей частицы [52, 53]. Критический заряд, характеризующий помехоустойчивость, например, КМОП ячейки статической памяти, является интегральной характеристикой ячейки и зависит от совокупности всех топологических и электрических

параметров данной ячейки, таких как крутизна, пороговые напряжения и емкости транзисторов и может быть рассчитан с помощью стандартных систем схемотехнического проектирования (например, CADENCE SPECTRE или ORCAD).

Импульс ионизационного тока от тяжелой заряженной частицы моделируется генератором тока:

$$I_{\text{ioniz}}(t, Q_0) = \frac{Q_0}{\tau_F - \tau_R} \exp(-t/\tau_R) - \exp(-t/\tau_F) \quad (7)$$

где Q_0 - индуцированный одиночной частицей заряд, τ_F - время спада тока, связанное со временем собирания заряда ($\sim 0.2 \dots 0.4$ нс), τ_R - время нарастания тока, связанное со временем дрейфа носителей через ОПЗ p - n перехода ($\sim 10 \dots 50$ пс). Времена считаются фиксированными, а рассчитанное значение собранного заряда Q_0 , при котором происходит переключение, считается критическим зарядом Q_C . Входной информацией для расчетов является набор SPICE параметров BSIM3 для всех компонентов ячейки памяти. В свою очередь, расчетные значения критического заряда являются входной информацией для программы расчета скорости сбоев в условиях космического пространства (PRIVET).

Параметры транзисторов ячейки задаются с использованием системы модели BSIM3v3, позволяющей работать с субмикронными длинами каналов. Было проведено исследование влияния основных параметров ячейки памяти на величину ее критического заряда. В частности, были исследованы: влияние топологических характеристик (рост отношения ширины к длине канала W/L приводит к увеличению критического заряда и, соответственно, меньшей вероятности сбоя); порогового напряжения (увеличение порогового напряжения приводит к снижению Q_C); крутизны (чем больше крутизна, тем больше Q_C); емкости узлов (Q_C и время переключения зависят от соотношения емкостей обратных связей); сопротивления в цепи обратной связи (увеличивает Q_C) и напряжения питания (см. рис. 14). Было показано, что влияние схемотехнических и технологических параметров на чувствительность ячейки памяти к отдельным частицам часто носит противоречивый характер.

Например, увеличение крутизны p -канального МОПТ за счет увеличения его ширины при фиксированной ширине 2-х транзисторов, с одной стороны, увеличивает критический заряд при попадании частицы в сток p -МОПТ, но снижает Q_C при попадании в сток p -МОПТ (см. рис. 15). Таким

образом, детальное схемотехническое моделирование позволяет проводить оптимизацию радиационной стойкости ячейки памяти вообще, и чувствительности к воздействию отдельных ионизирующих частиц в частности.

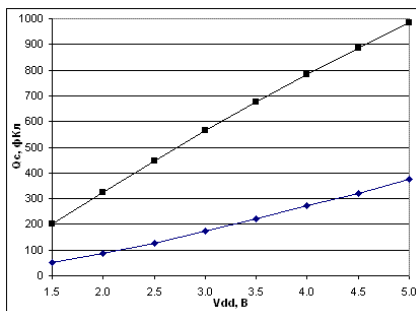


Рис.14. Расчетные значения критического заряда ячейки памяти как функция напряжения питания для попадания в *n*-МОПТ и *p*-МОПТ

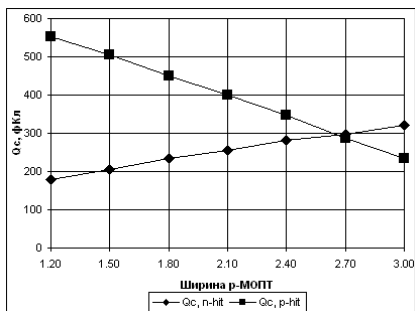


Рис.15. Расчетные зависимости критического заряда от ширины транзисторов (в мкм) в ячейке памяти (суммарная ширина двух транзисторов составляет 3.9 мкм)

Инжекция заряда основных носителей в изолированную базу КНИ транзистора при прохождении отдельной ионизирующей частицы может приводить к возникновению паразитного биполярного эффекта, что может существенно снизить помехоустойчивость ячейки.

Табл. 2. Экспериментальные параметры чувствительности для КМОП объемной и КНИ 0.5 мкм технологии

	объемная технология	КНИ с плавающим телом	КНИ с заземленным телом
сечение насыщения, 10^{-7} см ² /бит	14	1	1
критическое ЛПЭ, МэВ см ² /мг	6	2	8

Развитая физическая модель паразитного биполярного эффекта в КНИ транзисторах [54, 55] вместе со схемотехническим моделированием показали, что КНИ КМОП ячейки памяти с изолированным (плавающим) телом имеют в общем случае существенно меньшее значение критической энергии (ЛПЭ) по сравнению с ячейками с заземленным телом (см. табл. 2), что нашло полное экспериментальное подтверждение (см. ссылки в [1]).

6. Методы расчета интенсивности одиночных сбоев от тяжелых заряженных частиц и протонов космического пространства

Разработка микроэлектронных систем для космических и специализированных применений требует автоматизированных средств и методов расчета и предсказания скорости сбоев и вероятности отказов в заданном радиационном окружении и для заданных значений технологических параметров элементов интегральных структур, описанию которых посвящена глава 5.

Методы прогнозирования скорости сбоев (отказов) цифровых компонентов интегральных схем от одиночных высокоэнергетических частиц космического пространства основываются на сечениях, определяемых экспериментально в ходе наземных испытаний. Понятие сечения сбоя в литературе определено неоднозначным образом. Дифференциальное сечение сбоя от одиночных частиц строго определяется как

$$\sigma_{\Lambda; \theta, \varphi} = \frac{dN_{\Lambda; \theta, \varphi}}{\phi_{\Lambda; \theta, \varphi} d\Omega d\Lambda}, \quad (7)$$

где $d\Omega = d\cos\theta d\varphi$ - элемент телесного угла, $dN_{\Lambda; \theta, \varphi}$ - количество сбоев, возникших из-за частиц с ЛПЭ в диапазоне $\Lambda \div \Lambda + d\Lambda$, прилетевших из элемента телесного угла $d\Omega$ с направлением θ, φ (соответственно полярный и азимутальный угол относительно нормали к поверхности схемы), $\phi_{\Lambda; \theta, \varphi}$ [см⁻² стерад⁻¹ (МэВ-см²/мг)⁻¹] – дифференциальный поток частиц на единицу телесного угла и на единицу ЛПЭ. С учетом (7), формула для полного количества сбоев приобретает вид

$$N = \iiint \sigma_{\Lambda; \theta, \varphi} \phi_{\Lambda; \theta, \varphi} d\cos\theta d\varphi d\Lambda. \quad (8)$$

На практике спектр ЛПЭ считается изотропным и тогда предыдущая формула упрощается и принимает вид

$$N = \int \langle \sigma_{\Lambda} \rangle \Phi_{\Lambda} d\Lambda, \quad (9)$$

где $\Phi_{\Lambda} = 4\pi \phi_{\Lambda; \theta, \varphi}$ – дифференциальный спектр ЛПЭ изотропного потока частиц, $\langle \sigma_{\Lambda} \rangle$ – сечение сбоев, усредненное по полному телесному углу. Усреднение по телесному углу можно выполнить с использованием большого набора экспериментальных зависимостей сечений от ЛПЭ для разных углов падения. На практике это невозможно по экономии

ческим причинам. Поэтому усреднение по полному углу можно заменить усреднением по длинам хорд чувствительного объема ячейки памяти

$$\langle \sigma \Lambda \rangle = \frac{1}{4\pi} \iint \sigma \Lambda; \theta, \varphi d \cos \theta d \varphi = \frac{S_0}{4} \int_0^{s_{\max}} K \Lambda s - E_C f s ds \quad (10)$$

с привлечением распределения $f(s)$ по длинам хорд для заданной формы чувствительного объема и концепции критического заряда (и соответствующего критического энерговыделения) E_C .

Тогда количество сбоев представляется в виде функционала на двумерной области «ЛПЭ – длина хорды» [55, 56]

$$N = (S_0 / 4) \int_0^{s_{\max}} ds f(s) \int_{\Lambda_{\min}}^{\Lambda_{\max}} d\Lambda K(\Lambda, s, Q_C) \phi(\Lambda), \quad (11)$$

где S_0 – площадь поверхности чувствительного объема, $K(\Lambda - E_C)$ – функция чувствительности, имеющая вид размытой ступеньки, которая параметризуется распределением Вейбулла, извлекаемого из экспериментальной зависимости сечения сбоев от ЛПЭ. Эта формула является наиболее общей математической структурой в рассматриваемом приближении и в разных частных приближениях сводится к известным и используемым в мировой практике методам расчета. Для каждого элемента этой области вычисляется вероятность сбоя, определяемая произведением дифференциального распределения длин хорд, ЛПЭ спектра и функции чувствительности. Вид подынтегрального выражения изображен на рис. 16; полная скорость сбоев равна интегралу по всей области, т.е. объему фигуры под поверхностью.

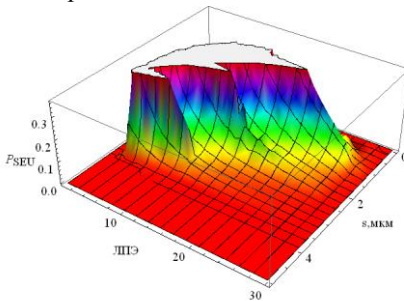


Рис. 16. Вероятность сбоя, рассчитанная как функция ЛПЭ (в МэВ см²/мг) и длины трека (мкм) в чувствительной области

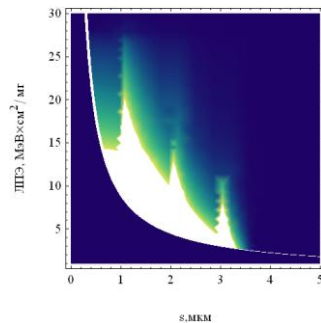


Рис.17. График уровней вероятности сбоев (более светлые участки соответствуют максимальной вероятности сбоев)

Из рис. 16 видно, что разные участки двумерной области «ЛПЭ – длина трека» дают разные вклады в количество сбоев. Особенно хорошо это видно из графика горизонтальных уровней вероятности сбоев, показанного на рис. 17. В диссертации показано, что предложенный подход содержит как частные приближения все основные расчетные модели, используемые в американских расчетных кодах.

На основе описанного подхода разработана программа PRIVET (**P**rogramming **R**ate of **I**rrregularities **V**ersus **E**nergy **T**hreshold)– симулятор интенсивности сбоев для заданного спектра космических излучений [56, 57]. Входными данными программы PRIVET являются, в частности, характеристики радиационного окружения (спектры ЛПЭ на заданной орбите космического пространства, защита и т.п.), а также геометрические размеры чувствительной области и величина критического заряда ячейки памяти.

Симулятор PRIVET используется как одно из вычислительных ядер программного комплекса «ОСОТ» (**О**диночные **С**бои и **О**Тказы), предназначенного для количественного прогнозирования скорости сбоев при воздействии тяжёлых заряженных частиц (ТЗЧ) и высокоэнергетических протонов (ВЭП) космического пространства (КП). Программный комплекс «ОСОТ» представляет собой независимое приложение Windows, выполненное в среде Delphi. Исходными данными для комплекса является экспериментальная зависимость сечения сбоев от ЛПЭ ТЗЧ (энергии ВЭП), параметры орбиты (апогей, перигей, наклонение), номер года от начала солнечного цикла, степень солнечной активности (низкая, средняя, высокая), массовая защита (в г/см²). Комплекс «ОСОТ» имеет модульную структуру, включающую в себя:

- модуль обработки результатов эксперимента, разработанный под руководством соискателя и предназначенный для аппроксимации экспериментальной зависимости сечений сбоев от ЛПЭ ТЗЧ и энергии протонов с использованием аналитических функций (функция Вейбулла и др.);
- модуль расчёта условий эксплуатации, рассчитывающий ЛПЭ спектры ТЗЧ и энергетические спектры потоков протонов на основе моделей потоков заряженных частиц КП, разработанных в НИИЯФ МГУ;
- два модуля расчета скорости сбоев от ТЗЧ (в т.ч. PRIVET) и модуль расчета скорости сбоев от протонов, также разработанный под руководством соискателя.

Сравнительные расчеты спектров и скоростей сбоев комплекса OCOT и CREME96 выявили почти полное совпадение по спектрам и хорошую корреляцию по скорости сбоев. Безусловным критерием адекватности расчетов является сравнение с полетными данными, которое проведено по американским литературным данным. Сравнительные результаты расчетов OCOT и CREME96 и экспериментов представлено на рис.18.

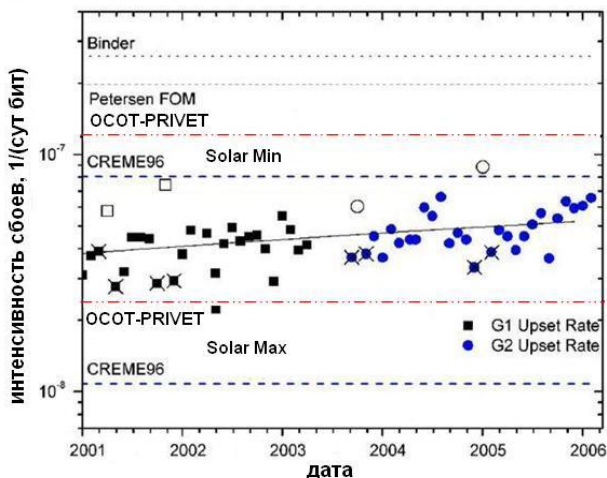


Рис.18. Сравнение полетных данных и результатов расчетов OCOT и CREME96

Таким образом, комплекс программ OCOT (PRIVET) является по возможностям полным аналогом закрытой программы CREME96, но обладает более корректной математической структурой, хотя имеет тот же класс точности, поскольку основан на одном уровне физических приближений.

7. Моделирование ионизационного воздействия нейтронов на элементы КМОП технологий высокой степени интеграции

Общеизвестно, что микросхемы КМОП технологии чувствительны к ионизационным эффектам и весьма устойчивы к эффектам смещения. Тем не менее, в последнее время широко обсуждается вопрос о влиянии нейтронов на КМОП схемы, что связано со ставшей актуальной проблемой мягких (т.е. обратимых) отказов при воздействии вторичных нейтронов жесткого космического излучения. В настоящее время установлено, что вторичные нейтроны являются главной причиной одиночных сбоев в бортовой электронике (авионике) самолетов, летающих на больших высотах (>10 км). Вторичные нейтроны образуются в результате взаимодействия первичных высокоэнергетических космических частиц галактического излучения или солнечного ветра с атмосферной средой в результате сложных многоступенчатых процессов размена энергии. Образовавшиеся нейтроны имеют широкий диапазон спектра энергии и могут приводить к сбоям различного характера.

Обратимые, или, “мягкие” сбои (Single Event Upset, soft errors) обусловлены локальными ионизационными эффектами, в так называемых чувствительных объемах активных областей микросхем; например, в областях обратносмещенных стоков МОП транзисторов элементов статической и динамической памяти. Другим типом необратимых сбоев (отказов) являются т.н. жесткие ошибки (hard errors) или залипающие биты (stuck bits). Чаще всего такие ошибки возникают за счет т.н. микродозового эффекта, т.е. локальной флуктуации энерговыделения в чувствительном микрообъеме слоев изоляции с последующим захватом высвобождаемого заряда. Такого рода эффекты, подробно рассмотренные в **главе 6**, являются промежуточными между эффектами полной дозы и одиночными радиационными эффектами.

Роль ионизирующих частиц могут выполнять как первичные ТЗЧ космического пространства, так и вторичные продукты ядерного взаимодействия нейтронов (и протонов) с атомами материала. Общая ионизационная способность нейтронов невелика, но в современных элементах микроэлектроники часто существенна не средняя ионизационная доза в больших объемах, а локальные эффекты, имеющие место в чувствительных микрообъемах микроэлектронных элементов. Размеры чувствительных

объемов приборов старых технологий выражались микронами, в современных технологиях – долями микронов. В первом случае длина пробега вторичных частиц оказывалась меньше характерных размеров чувствительного объема L_{Ω} , в то время как для современных приборов типичным является выполнение неравенства $L_R > L_{\Omega}$ (см. рис. 19).

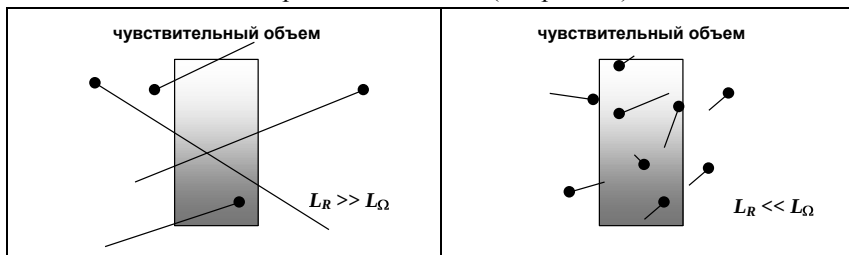


Рис.19. Приближения малого (а) и большого (б) чувствительного объема

При условии выполнения этого неравенства чувствительный объем находится в поле потока вторичных частиц ядерных реакций и при расчете можно использовать идеологию усреднения по распределению хорд, развитую в гл. 5 для случая первичных ТЗЧ.

Предложенная модель жестких сбоев [58, 59] основывается на следующих предположениях:

(1) Одиночный ион (первичная ТЗЧ, либо вторичные частицы ядерных взаимодействий), попадающий в чувствительный объем ячейки памяти, включающий в себя подзатворный окисел и/или прилегающий микрообъем боковой изоляции (см. рис. 20), приводит к генерации и захвату в этом объеме некоторого количества положительного заряда и соответствующему сдвигу локального значения порогового напряжения паразитного транзистора.

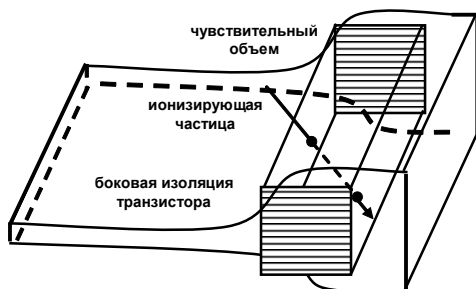


Рис. 20. Чувствительная область транзистора

(2) Жесткий отказ связан с недопустимым увеличением тока утечки транзистора. Если сдвиг порога превышает некоторое критическое значение, то это приводит к «залипанию» бита, т.е. функциональному отказу.

Среднее энерговыделение в приближении Бете-Блоха при заданной длине трека имеет вид $\varepsilon s = \Lambda s$. В действительности же величина энергии, затраченная ионом на процессы ионизации, подвержено фундаментальным флуктуациям (т.н. страгглинг), и корректный учет этих флуктуаций лежит в основе разработанной модели. В зависимости от значения некоторого характерного параметра, разброс описывается распределением Гаусса, либо Вавилова, либо Ландау. Все экспериментальные ситуации, описанные в литературе по жестким отказам, более всего соответствуют случаю распределения Ландау $P_L(E, s)$ [60, 61].

Сечение жесткого отказа для ячейки памяти может быть записано в виде свертки по дифференциальной функции распределения длин хорд

$$\sigma_{SB} \Lambda = S_0 N \int_0^{s_{\max}} f(s) \int_{E_C}^{\infty} P_L(E, s) ds \quad (12)$$

Критическая энергия E_C может быть оценена, исходя из запаса помехоустойчивости ячейки памяти, либо рассчитана с помощью схемотехнического подхода. Предлагаемая модель расчета стохастического энерговыделения позволяет рассчитывать зависимость сечения жестких отказов от ЛПЭ ионизирующих частиц.

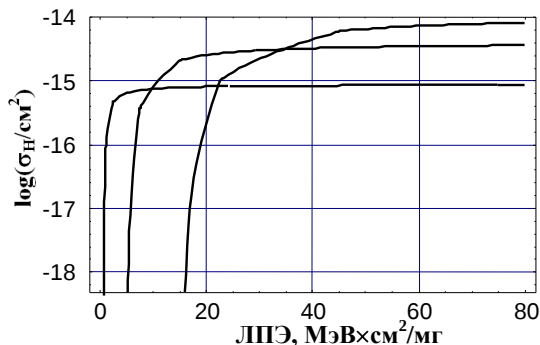


Рис.21. Расчетные зависимости сечений жестких отказов ($\sigma_H/\text{см}^2$) от ЛПЭ вторичных частиц, индуцированных нейтронами; толщина и ширина чувствительного объема $0,35 \times 0,2 \text{ мкм}^2$; три различные длины канала – 0.1; 0.5; 1.5 мкм

Сравнение с экспериментальными данными показывает, что модель позволяет количественно и качественно оценить сечения отказов для ионов с различными энергиями. Выбор параметров модели может быть сделан на основе данных, полученных от изготовителя ИС, или оценен на основе топологических данных и схемотехнического расчета. Влияние сто-

хастического захвата локального заряда в изоляции перспективных нано-электронных компонентов (в т.ч. high-K диэлектриках) рассмотрено в [62].

8. Схемотехническое моделирование защелки в КМОП микросхемах при воздействии одиночных тяжелых ионов или импульсного излучения

Известно, что воздействие одиночных высокоэнергетических частиц и импульсное ионизирующее излучение могут являться причиной катастрофических отказов в микроэлектронных компонентах. Особую проблему составляют необратимые эффекты, связанные с возбуждением паразитного тиристорного эффекта в четырехслойных *n-p-n-p* структурах КМОП микросхем (т.н. радиационно-индуцированная защелка, “latchup”), моделированию которых посвящена **глава 7**. Долгое время предполагалось, что уменьшение напряжения питания решит эту проблему. Тем не менее, радиационно-индуцированные защелки от одиночных частиц продолжают наблюдаться в приборах современных технологий с напряжениями питания в пределах 1...2 В. Это связано с тем, что уменьшение характерных размеров ячейки статической памяти ведет к увеличению коэффициента усиления паразитных биполярных транзисторов, что оставляет проблему защелки актуальной для приборов с технологическими нормами 100 нм и менее. В диссертации приведены расчеты, выявляющие влияние различных технологических и схемотехнических факторов на параметры чувствительности ИМС к защелке от воздействия отдельных ТЗЧ [63-64].

Другим аспектом проблемы является защелка от воздействия импульсного ИИ, что особенно важно в военных приложениях. Импульсное облучение сопровождается глобальными ионизационными эффектами и специфичным эффектом просадки локального напряжения на шинах питания.

Для моделирования этих эффектов предложена простая эквивалентная схема на основе стандартной двухтранзисторной схемы с дополнительным генератором тока, характеризующим ионизационный ток по шине питания (см. рис. 22). Результаты моделирования представлены на рис. 23, из которого видно, что при некотором уровне импульсного воздействия критический заряд защелки начинает расти.

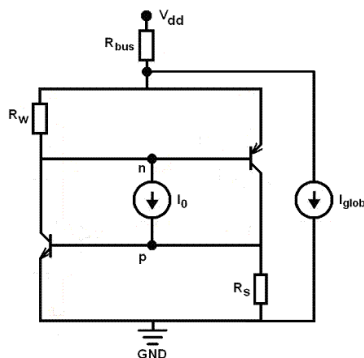


Рис. 22. Модифицированная двухтранзисторная эквивалентная схема для моделирования эффектов просадки при импульсном воздействии

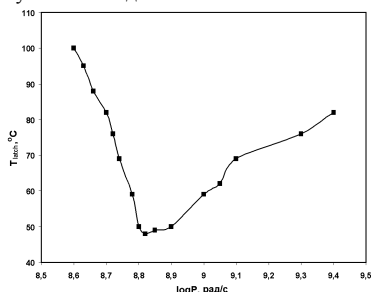


Рис. 24. Экспериментальная зависимость критической температуры защелки T_{latch} от логарифма мощности дозы импульсного излучения $\log P$

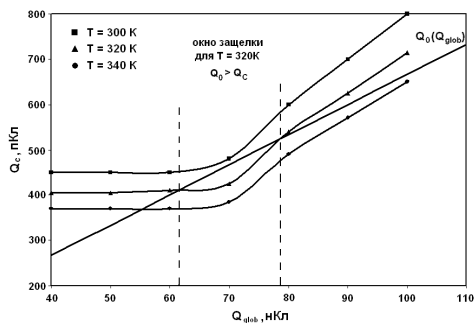


Рис. 23. Расчетные зависимости критического заряда Q_C как функции Q_{glob} для различных значений температуры T и зависимость заряда, собранного в локальной паразитной структуре $Q_0 = (1/a)Q_{glob}$

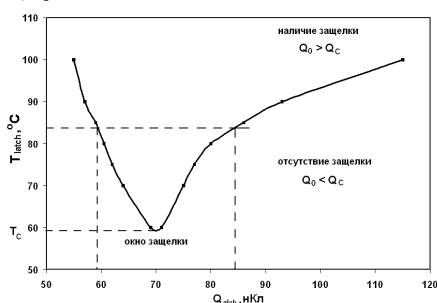


Рис. 25. Расчетная зависимость критической температуры защелки T_{latch} как функция Q_{glob}

Возрастание критического заряда является прямым следствием эффекта просадки напряжения питания, при котором развитие защелки в отдельной структуре подавляется за счет снижения эффективного напряжения питания. Таким образом, глобальные ионизационные эффекты начинают модифицировать локальные параметры структуры, определяющие режим защелки, делая критический заряд нелинейной функцией внешнего воздействия. Именно эта нелинейность обуславливает возможность появления т.н. «окон» защелки (т.е. изолированного диапазона мощности дозы импульсного ИИ, в котором защелка имеет место). Из эксперимента известно, что диапазон окна защелки растет с ростом температуры (см. рис. 24). Объяснение нетривиального характера зависимости окна защелки от

температуры можно видеть из результатов моделирования на рис. 23, где приведены расчетные зависимости критического заряда Q_C как функции $Q_{glob}(D)$ при различных температурах, совмещенные с дозовой зависимостью заряда, собранного в локальной паразитной структуре, $Q_0 \propto Q_{glob}(D)$. Диапазон возможной зашелки («окно» зашелки) определяется условием $Q_0 > Q_C$. Результаты моделирования (см. рис. 25) демонстрируют хорошую качественную и количественную корреляцию с экспериментом. В диссертации обсуждается также влияние технологических параметров микросхемы на ее чувствительность к радиационно-индуцированной зашелке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработанная диффузионно-дрейфовая модель КНИ МОП транзисторов с частичным и полным обеднением, способная единым и непрерывным образом описывать в компактной аналитической форме вольтамперные характеристики транзистора во всех режимах его работы, может быть использована для моделирования токов утечки облученных приборов. Представлено обобщение модели на случай наноразмерных приборов с баллистическим переносом носителей в канале, а также на случай перспективных конфигураций с двойным затвором, обеспечивающих предельные характеристики приборов КМОП технологий.

2. Разработанная комплексная модель радиационно-индуцированных токов утечки, обусловленных захваченным зарядом в толстых слоях краевой изоляции, позволяет с высокой точностью проводить расчеты ВАХ облученных транзисторов КНИ и объемных технологий, а также дозовых зависимостей при разных условиях облучения. Продemonстрировано, что учет процессов радиационно-стимулированного отжига, связанного с процессом компенсации положительного заряда в окисле радиационно-индуцированными электронами из зоны проводимости SiO_2 , является критически важным для адекватного моделирования. Расчетным образом показано, что краевой контакт между телом КНИ транзистора и землей может блокировать краевую утечку и существенно повысить радиационную стойкость ИС, что нашло подтверждение на эксперименте.

3. Показано, что развитая количественная модель аномального эффекта низкой интенсивности (ELDRS) в толстых слоях полевых окислов биполярных транзисторов хорошо описывает широкий круг экспериментальных данных и может служить основой для расчетно-

экспериментальной методики прогнозирования деградации биполярных приборов в условиях низкоинтенсивных ИИ, что является одной из ключевых задач обеспечения радиационной стойкости аналоговых микросхем в условиях космического пространства.

4. Показано, что характеристика одиночных радиационных эффектов является комплексной многоуровневой задачей, основанной на схемотехнических расчетах и экспериментальных методах определения параметров чувствительности ИС. Использование схемотехнических методов позволило систематическим образом определять влияние топологических, физических и технологических факторов на характеристики чувствительности. Был сделан вывод, что заземление тела КНИ транзисторов должно приводить к существенному увеличению порогового значения ЛПЭ ячейки КМОП статической памяти, что было подтверждено экспериментально.

5. Предложенный общий математический метод расчета интенсивности сбоев при воздействии ТЗЧ и протонов космического пространства лег в основу комплекса программ ОСОТ, разработанный в рамках создания испытательного центра для характеристики параметров чувствительности микроэлектронных компонентов на воздействие отдельных частиц, создаваемого на базе ускорителя ИТЭФ под эгидой НИИКП.

6. Разработанные вычислительные методы расчетов сечений воздействия нейтронов на компоненты КМОП технологий могут служить базой для оценки интенсивности необратимых (катастрофических) отказов в полях нейтронных излучений, а именно в установках ядерной энергетики, бортовой авионики, а также в военных приложениях.

7. Результаты расчетов критического заряда радиационно-индуцированной защелки при воздействии отдельных ионизирующих частиц позволяют выявить влияние различных технологических и схемотехнических факторов на параметры чувствительности ИМС. Показано, что учет эффекта просадки напряжения при импульсном облучении позволяет объяснить экспериментальные особенности появления окон защелки при воздействии импульсного излучения при разных температурах.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Зебрев Г. И. Моделирование работы и процессов деградации МОП транзисторов, обусловленных воздействием ионизирующего излучения // дисс. канд. техн. наук (05.27.-01 - твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника на квантовых эффектах) М.: МИФИ, 2003. – 126 с.
2. Усейнов Р. Г., Зебрев Г. И. Флуктуационная теория поверхностных состояний в МОП структурах для объемного распределения окисного заряда // ФТП. – 1986. – Т. 20. - №11. – С. 2002-2007.
3. Зебрев Г. И., Усейнов Р. Г. Простая модель вольтамперных характеристик МОП транзистора // ФТП. – 1990. - Т. 24. - №5. - С.777-781.
4. Зебрев Г. И. Вольтамперная характеристика МОП транзистора с учетом зависимости подвижности от продольного электрического поля // ФТП. – 1992. - Т. 26. - №1. – С. 83-88.
5. Зебрев Г. И. Статическое экранирование в инверсионном слое // ФТП. – 1992. – Т.26. - №9. – С. 1550-1555.
6. Зебрев Г. И. Эффективная подвижность при рассеянии на шероховатостях границы раздела в инверсионном слое // ФТП. - 1990. – Т. 24. – С. 908-912.
7. Усейнов Р. Г., Зебрев Г. И. Простой метод определения плотности поверхностных состояний по температурным измерениям ВАХ МОП транзисторов // ФТП. – 1990. –Т. 24. - №4. – С. 752-754.
8. Зебрев Г. И. Кинетика накопления и туннельного отжига радиационно-индуцированного заряда в окисле МОП структур // Вопросы атомной науки и техники. – 1994. - №1-2. - С. 34-36.
9. The use of conversion model for CMOS IC prediction in space environments / I. N. Shvezov-Shilovsky, V. V. Belyakov, V. V. Emelianov, V. S. Pershenkov, M. Y. Popov, G. I. Zebrev // IEEE Trans. on Nucl. Sci. – 1996. - V. 43. – P. 3182-3188.
10. Прогнозирование дозовых эффектов в элементах МОП технологий при воздействии низкоинтенсивного ионизирующего излучения космического пространства / В. В. Беляков, Г. И. Зебрев, В. С. Першенков, С. В. Черепко // Инженерная физика. – 1999. - №2. – С. 40-45.

11. Корреляция радиационных эффектов в МОП транзисторах и логических интегральных схемах / В. В. Емельянов, Р. Г. Усейнов, Г. И. Зебрев // Микроэлектроника. – 1995. - №5. – С.85.
12. An approach to prediction of MOS integrated circuits radiation response for high-frequency operation in space environments / G. I. Zebrev, I. N. Shvetsov-Shilovsky, S. S. Lomakin, V. S. Pershenkov, S. G. Petrov // RADECS 2000 Workshop Proc. - Louvan-la-Neuve. - Belgium. - 2000. - P.53-58.
13. Radiation response of MOSFET's parameters as a function of measurement temperature / G. I. Zebrev, V. V. Belyakov, I. N. Shvezov-Shilovsky, R. G. Useinov // Proc. of the Fourth European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems RADECS-97. -1997. - P.159-163.
14. Zebrev G. I., Belyakov V. V. Experimental technique for MOS transistor radiation response analysis in subthreshold and above threshold regions // Proc. of the II International Conference on Microelectronics and Computer Science, ICMCS-97. – Moldova. - P. 37-40.
15. Метод прогнозирования работоспособности МОП интегральных схем на высоких частотах при воздействии космического излучения / Г.И. Зебрев, И.Н. Швецов-Шиловский, С.С. Ломакин, В.С. Першенков, С.Г. Петров // ВАНТ. – В. 1-2. – 2001.
16. Zebrev G. I., Lomakin S. S. Temperature response of irradiated MOSFETs // 23rd International Conference on Microelectronics (MIEL) Proceedings – Nis. – Yugoslavia. - 2002. - P. 413-415.
17. Reversible positive charge annealing in MOS transistor during electrical and thermal stresses / V. V. Emelianov, G. I. Zebrev, V. N. Ulimov, R. G. Useinov, V. V. Belyakov, V. S. Pershenkov // Proc. of the Third European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems. - RADECS-95. - P.61-65.
18. Reversible positive charge annealing in MOS transistors/ V. V. Emelianov, G. I. Zebrev, R. G. Useinov, V. V. Belyakov, V. S. Pershenkov // IEEE Trans. on Nucl. Sci. – 1996. – V.43. – P. 805 - 809.
19. Radiation induced behavior in MOS devices / V. V. Emelianov, G. I. Zebrev, O. V. Meshurov, A. V. Sogoyan, R. G. Useinov // Fundamental aspects of ultrathin dielectrics on Si-based devices // ed. by E.Garfunkel. - Kluwer Academic Publishers. –1998. - P. 391-396.

20. Зебрев Г. И., Ломакин С. С. Влияние горячих носителей и ионизирующего излучения на спектр поверхностных состояний в МОП транзисторах // Приборы и техника эксперимента. - 2000. - №6. – С. 92-96.
21. Ломакин С.С., Зебрев Г.И. Изменение спектра поверхностных состояний в МОП-транзисторах под воздействием горячих носителей и ионизирующего излучения // ВАНТ. – В. 1-2. – 2002.
22. Effect of emitter-base bias during pre-irradiation infrared illumination on the radiation response of bipolar transistors / V. S. Pershenkov, A. Y. Bashin, G. I. Zebrev, S. V. Avdeev, V. V. Belyakov, V. N. Ulimov, V. V. Emelianov // IEEE Trans. on Nucl. Sci. – 2002. – V. 49. – No.6. – P. 2998 - 3001.
23. Pershenkov V.S., Avdeev S.V., Tsimbalov A. S., Levin M. N., V. V. Belyakov, D. V. Ivashin, A. Y. Slesarev, A. Y. Bashin, Zebrev G. I., V. N. Ulimov: Use of preliminary ultraviolet and infrared illumination for diagnostics of MOS and bipolar devices radiation response // Microelectronics Reliability – V. 42. – No.1. – 2002. – P. 797 -804.
24. Першенков В.С., Авдеев С.В., Беляков В.В., Ивашин Д.В., Башин А.Ю., Зебрев Г.И. Использование предварительной обработки ультрафиолетовым и инфракрасным излучением для диагностики радиационного отклика биполярных и МОП-транзисторов// ВАНТ. – В. 4. – 2002.
25. Моделирование радиационных эффектов в элементах интегральных схем / С.В. Авдеев, В.В. Беляков, Г.И. Зебрев, В.С. Першенков, А.В. Согоян // Инженерная физика. - №2. – 2002. – С. 14 – 24.
26. Накопление и отжиг поверхностных состояний при воздействии низкоинтенсивных излучений космического пространства с учетом высокочастотных переключений на затворе / Г.И. Зебрев, В.С. Першенков, И.С. Морозов, И.Н. Швецов-Шиловский // ВАНТ. – В. 4. – 2003.
27. Использование инфракрасного излучения для моделирования эффекта низкой интенсивности в биполярных *n-p-n*-транзисторах/ А.Ю. Башин, Г.И. Зебрев, В.С. Першенков, Д. Ю. Павлов // ВАНТ. – В. 1-2. – 2004.
28. Zebrev G. I., Pershenkov V.S., Shvetzov-Shilovsky I.N., Morozov I. Build-up and Annealing of Interface Traps under the Influence of Low-Dose-Rate Space Irradiation Taking into Account High-Frequency Gate Bias Switches // 7th European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems RADECS 2003 Proceedings. – 2003. – P. 439-445.

29. Беляков В.В., Зебрев Г.И., Першенков В.С. и др. Методы прогнозирования эффектов полной дозы в элементах современной микроэлектроники // Микроэлектроника. – 2003. – Т.32. - №1. – С.31-46.
30. Zebrev G.I. Gorbunov M.S. Diffusion-Drift Model of Fully Depleted SOI MOSFET // MIEL 2006 Proceedings. – 2006. - P.545-548.
31. Zebrev G.I., Gorbunov M.S. Compact Physical Modeling of Fully Depleted SOI MOSFET // Proceedings SPIE.– 2006.- Vol. 6260, DOI:10.1117/12.683544. - 620601P (8 pages).
32. Zebrev G.I. Physical Modeling of Double-Gate Transistor // 24th International Conference on Microelectronics (MIEL) Proceed. – 2004. - V. 1 - P. 303-306.
33. Зебрев Г.И. Физические основы кремниевой нанoeлектроники. - Библиотека ядерного университета. – М. : МИФИ. – 2008. – 286 с.
34. Zebrev G.I. Nonequilibrium Diagrammatic Technique for Nanoscale Devices // Proceedings SPIE. – 2006. - Vol. 6260, DOI:10.1117/12.683544. - 62601M (9 p.)
35. Zebrev G.I. Graphene Nanoelectronics: Electrostatics and Kinetics // Proceedings SPIE.– 2008.- Vol. 7025. – P. 70250M - 70250M-9.
36. Zebrev G.I. Electrostatics and Diffusion-Drift Transport in Graphene Field Effect Transistors. - 26th International Conference on Microelectronics (MIEL 2008) Proceedings. – 2008. – PP. 159-162.
37. Zebrev G.I., Gorbunov M.S. Modeling of Radiation-Induced Leakage and Low Dose-Rate Effects in Thick Edge Isolation of Modern MOSFETs // European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems RADECS 2008 Proceedings. – 2008. – P. 459-464.
38. Zebrev G.I., Gorbunov M.S., Osipenko P.N. Multi-scale Modeling of Low Dose-Rate Total dose Effects in Advanced Microelectronics // 26th International Conference on Microelectronics (MIEL 2008) Proceedings. – P. 591 – 594.
39. Zebrev G.I., Gorbunov M.S. Modeling of Radiation-Induced Leakage and Low Dose-Rate Effects in Thick Edge Isolation of Modern MOSFETs // IEEE Transactions on Nucl. Sci. – 2009. – V.56. - №4. – 7 pages.
40. Поверхностные радиационные эффекты в интегральных схемах // А.В. Согоян, Г. И. Зебрев, А.Ю. Никифоров, В.С. Першенков, А.И. Чумаков // Модель космоса" в 2 тт. // под ред. Л.И. Панасюка и Л.С. Новикова. – 2007. - Т.2. - Гл. 1.18. – С. 466-493.

41. Зебрев Г.И. Моделирование эффекта низкой интенсивности в толстых окислах интегральных структур// ВАНТ. – в. 1-2. – 2005.
42. Зебрев Г. И. Моделирование эффекта низкой интенсивности в толстых изолирующих слоях современных интегральных схем // Микроэлектроника. - 2006. – Т. 35. - №3. – С. 209-216.
43. Zebrev G.I., Pavlov D.Y. Radiation Response of Bipolar Transistors at Various Irradiation Temperatures and Electric Biases // European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems RADECS 2005 Proceedings. – 2006. – PG4-1 - PG4-6.
44. Zebrev G.I., Pavlov D.Y. Radiation Response of Bipolar Transistors at Various Irradiation Temperatures and Electric Biases // IEEE Transactions on Nucl. Sci. – 2006. – V.53. - №4. – P. 1981-1987.
45. Зебрев Г.И., Анашин В.С. Усиление деградации электронных компонентов при низкоинтенсивном излучении космического пространства как эффект мощности дозы // ВАНТ. – 2009. – В.2. – С. 15-22.
46. Экспериментальный метод прямого определения характеристик стойкости к одиночным радиационным эффектам с использованием ускорительного комплекса / В.С Анашин., Ю.Е. Титаренко, Н.Н Алексеев, В.Ф. Батяев, А.А. Голубев, Б.Ю. Шарков, В.А. Стебельков, В.В. Емельянов, Г.И. Зебрев, Н.В. Кузнецов // ВАНТ. – В. 3-4. – 2007.
47. Прямой контроль стойкости электронной компонентной базы к ионизирующим излучениям космического пространства в части одиночных радиационных эффектов. Методологические аспекты" / В.С. Анашин, В.В. Емельянов, Г.И. Зебрев, Н.В. Кузнецов, Ю.Е. Титаренко " // Российская научно-техническая конференция "Элементная база космических систем" (Элементная база-2007), МНТОРЭС им. А.С. Попова. Тезисы докладов конференции – Сочи, сентябрь 2007г.
48. Развитие информационных, методологических и структурно-технологических аспектов обеспечения стойкости радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к ионизирующим излучениям космического пространства / В.С. Анашин, В.В. Емельянов, Г.И. Зебрев, Н.В. Кузнецов, Ю.Е. Титаренко // Международная конференция "Авиация и космонавтика-2007". Тезисы докладов– М.: МАИ. - 2007.
49. Accelerator Based Facility for Characterization of Single Event Upsets (SEU) and Latchups (SEL) in Digital Electronic Components // V.S. Anashin, V.V. Emelyanov, G.I. Zebrev, I.O. Ishutin, N.V. Kuznetsov, B.Yu.

- Sharkov, Yu.A. Titarenko, V.F. Batyaev, S.P. Borovlev // A report at International Conference on Micro- and Nanoelectronics, October 2007, Zvenigorod, Russia.
50. Проблемы проведения испытаний электронной компонентной базы на стойкость к воздействию одиночных частиц космического пространства / В.С. Анашин, В.В. Емельянов, Г.И. Зебрев, Н.В. Кузнецов, Б.Ю. Шарков, Н.Н. Алексеев, Ю.Е. Титаренко, В.Ф. Батяев, Р.С. Тихонов, С.П. Боровлев, В.И. Рогов, М.А. Бутко, В. К. Павлов, А.Ю. Титаренко // ВАНТ. – В. 1. – 2008.
 51. Программное обеспечение испытаний стойкости электронной компонентной базы к одиночным эффектам от воздействия естественных ионизирующих излучений космического пространства / В.С. Анашин, Н.В. Кузнецов, Г.И. Зебрев, И.О. Ишутин, А.Н. Петров // Тр. Пятой международной научно-практической конференции “Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности”. – Т.13. – 2008.
 52. Исследование влияния схмотехнических параметров статической КМОП-ячейки памяти на стойкость к воздействию одиночных частиц ионизирующих излучений/ Е.А. Гагарин, В.Е. Шунков, Г.И. Зебрев. – Труды Научной сессии МИФИ. – Т.1. -2006. – С. 73-74.
 53. Physical Modeling and Circuit Simulation of Hardness of SOI Transistors and Circuits for Space Applications / G. I. Zebrev, M.S. Gorbunov, V.E. Shunkov. - RADECS Proceed. - 2006.
 54. Parasitic bipolar effect in modern SOI CMOS technologies / G.I. Zebrev, V.E. Shunkov, M.S. Gorbunov // Proceedings SPIE.– 2008.- Vol. 7025. – P. 702516 -702516-8.
 55. Зебрев Г.И. Расчет интенсивности единичных сбоев от тяжелых заряженных частиц космического пространства// ВАНТ. – В.4. – 2002. -С. 95 – 98.
 56. Zebrev G.I., Ladanov I.A. PRIVET-A Heavy Ion Induced Single Event Upset Rate Simulator in Space Environment // European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems RADECS 2005 Proceedings. – 2006. – PC13-1 – PC13-5.
 57. PRIVET – Simulator Single Event Upset Rate in Digital Memory Cells Induced by Heavy Ions of Space Environments // G.I. Zebrev, I.O. Ishutin,

- V.S. Anashin/ A report at International Conference on Micro- and Nanoelectronics, October 2007, Zvenigorod, Russia.
58. Зебрев Г.И. Метод оценки сечения нейтронно-индуцированных жестких отказов в ячейках КМОП-памяти // ВАНТ.– В. 1-2. – 2005
 59. Зебрев Г. И. Моделирование ионизационного воздействия нейтронов на элементы КМОП-технологий высокой степени интеграции // Микроэлектроника. - 2006. – Т. 35. - №3. – С. 217-229.
 60. Useinov R.G., Zebrev G.I. Physical Model of Single Heavy Ion Induced Hard Errors // 7th European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems RADECS 2003 Proceedings. – 2003. – P. 249-254.
 61. Усейнов Р.Г., Зебрев Г.И., Физическая модель жестких ошибок, обусловленных тяжелыми заряженными частицами в ИС памяти, Труды Научной сессии МИФИ. - 2004 - Т.1. - С. 80-81.
 62. Zebrev G.I., Gorbunov M.S., Pershenkov V.S. Radiation Induced Leakage Due to Stochastic Charge Trapping in Isolation Layers of Nanoscale MOS-FETs // Proceedings SPIE. – 2008. - Vol. 7025. – P. 702517-702517-8.
 63. Схемотехническое моделирование окон защелки в КМОП структурах под воздействием импульсного излучения при различных температурах / Г.И. Зебрев, Р.Г. Усейнов, М.Ю. Федоренко // Сборник тезисов Российской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2008». –В.11. – 2008.- С. 39-40.
 64. Схемотехническое моделирование радиационно-индуцированной защелки в КМОП микросхемах при воздействии одиночных тяжелых ионов или импульсного излучения / Г.И. Зебрев, Р.Г. Усейнов, М.Ю. Федоренко // ВАНТ.– В. 2. – 2009. – С. 10-14.