

На правах рукописи

Горбунов Максим Сергеевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ
КМОП ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ ТЕХНОЛОГИИ
«КРЕМНИЙ-НА-ИЗОЛЯТОРЕ» С ПОВЫШЕННОЙ СТОЙКОСТЬЮ
К ДОЗОВЫМ ЭФФЕКТАМ**

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

05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,
микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:



МОСКВА – 2010 г.

Диссертация выполнена в Национальном исследовательском ядерном
университете «МИФИ»

и

в Учреждении Российской Академии Наук
Научно-исследовательском институте системных исследований РАН

Научные руководители:

доктор технических наук
Зебрев Геннадий Иванович,
доцент кафедры «Микро- и наноэлектроники»
НИЯУ «МИФИ», г. Москва

и

кандидат технических наук
Осипенко Павел Николаевич,
заведующий отделом разработки
вычислительной техники НИИСИ РАН, г. Москва

Официальные оппоненты:

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

Усейнов Рустэм Галеевич, кандидат физ.-мат. наук,
ведущий научный сотрудник ФГУП «НИИП»

Ведущая организация: ФГУП «ЦНИИ «Комета»

Защита состоится 17 мая 2010 г. в 14.00 в конференц-зале К-608
на заседании диссертационного совета Д212.130.02 НИЯУ «МИФИ»
по адресу 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ «МИФИ».

Автореферат разослан « ____ » _____ 2010 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном эк-
земпляре, заверенным печатью организации, по адресу НИЯУ «МИФИ».

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



П.К. Скоробогатов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы диссертации. К микроэлектронным изделиям с длительным сроком функционирования в условиях действия ионизирующего излучения (ИИ) предъявляется ряд специфических требований, к числу наиболее значимых из которых можно отнести малое энергопотребление, малые габаритные размеры, широкий диапазон рабочих температур, высокая радиационная стойкость. В сочетании со сложностью (числом элементов) современных СБИС и их рабочими частотами выполнение указанных требований накладывает жесткие ограничения на схемотехнические, конструкционные и технологические решения таких изделий. Одним из перспективных технологических направлений является развитие технологии «кремний на изоляторе» (КНИ).

Можно выделить несколько основных дозовых эффектов, характерных для современных КМОП технологий:

- радиационно-индуцированные токи утечки;
- радиационно-индуцированный сдвиг порогового напряжения;
- радиационно-индуцированная деградация крутизны (подвижности) и подпорогового размаха передаточной характеристики;

Эти явления известны как эффекты полной дозы (Total Ionizing Dose (TID) Effects) и связаны с накоплением заряда в изолирующих оксидах и поверхностных состояниях на границе раздела Si-SiO₂. Дозовые эффекты в полупроводниковых приборах описаны в работах Першенкова В.С., Попова В.Д., Зебрева Г.И., Никифорова А.Ю., Емельянова В.В., Тельца В.А., Чумакова А.И., Сокояна А.В., а также зарубежных авторов: Schrimpf R.D., Fleetwood D.M., Barnaby H.J., Johnston A.H., Sexton F.W., Schwank J.R. и др.

В современных транзисторах с толщиной подзатворного оксида несколько нанометров накопление зарядов и поверхностных состояний даже при облучении с дозами ~1 Мрад (SiO₂) незначительно. Надпороговая вольтамперная характеристика (ВАХ) таких транзисторов практически не изменяется при таких дозах, а основной эффект дозовой деградации выражается в увеличении на несколько порядков подпороговых токов утечки. Радиационно-индуцированные токи утечки вызываются зарядом, захваченным в толстых слоях оксидов боковой и донной изоляции современных транзисторов КНИ КМОП технологии.

Существуют технологические и конструктивно-топологические методы повышения стойкости интегральных микросхем (ИМС) к дозовым эффектам. Технологические методы предполагают внесение изменений в техпроцесс, а конструктивно-топологические методы позволяют повысить

радиационную стойкость в рамках существующей коммерческой технологии. Неотъемлемой частью процесса создания таких методов является моделирование, которое, в силу сложности объекта, имеет многоуровневый характер и базируется на физическом и схмотехническом уровнях описания. Физический уровень моделирования описывает процессы деградации в материалах, структурах и приборах, поставляя выходные данные, которые могут использоваться как входные параметры для схмотехнического моделирования с использованием стандартных систем автоматического проектирования (САПР).

Кроме того, при проектировании радиационно-стойких ИМС разработчику требуется удобный инструмент, встроенный в стандартный маршрут проектирования и совместимый со стандартными коммерческими средствами САПР.

Остаётся ряд нерешенных задач, к главным из которых относятся:

- Задача физического и схмотехнического моделирования радиационно-индуцированных токов утечки в транзисторах КНИ КМОП технологии и связанных с ними механизмов накопления и отжига захваченного заряда в толстых слоях краевой и донной изоляции.
- Разработка и развитие конструктивно-топологических методов повышения радиационной стойкости КНИ КМОП ИМС.
- Определение параметров чувствительности КНИ КМОП ИМС к воздействию стационарного ионизирующего излучения в реальных условиях космического пространства, основываясь на результатах наземных испытаний.

Для смешанных (аналого-цифровых) ИМС растёт роль разброса параметров элементов, усиленного воздействием ионизирующего излучения.

Основной материал предлагаемой диссертации посвящен разработке и развитию методов схмотехнического моделирования и экспериментального исследования дозовых эффектов в транзисторах КНИ КМОП технологии различной топологической реализации.

Цель диссертации заключается в развитии методов и создании средств физического и схмотехнического моделирования работы КНИ КМОП ИМС в условиях воздействия ионизирующего излучения (ИИ) в различных электрических режимах.

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

- Разделение составляющих радиационно-индуцированной утечки, позволяющее на основе анализа экспериментальных данных определить направление оптимизации с целью подавления этого эффекта.

- Разработка математической модели, позволяющей определить SPICE-параметры КНИ транзисторов, с учётом влияния контакта к телу.
- Анализ эффективности различных топологических вариантов реализации КНИ МОП-транзисторов в зависимости от геометрии канала и электрического режима при облучении и выбор на основе анализа оптимального с точки зрения функционального назначения и радиационной стойкости топологического варианта.
- Разработка схемотехнических методов моделирования дозовых эффектов, в том числе радиационно-индуцированных токов утечки, в КНИ транзисторах и ИМС, изготовленных по КНИ КМОП технологии, с учётом электрического режима при облучении.
- Разработка программных средств, интегрированных в стандартный маршрут проектирования и совместимых с современными коммерческими средствами САПР, позволяющих учитывать дозовые эффекты на этапе схемотехнического проектирования.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Математическая модель, позволяющая получить SPICE-параметры КНИ транзисторов А- и Н-типа и учесть влияние контактов к телу на характеристики.
2. Расчетно-экспериментальный метод схемотехнического моделирования дозовых эффектов в КНИ КМОП ИМС, пригодный для включения в стандартный маршрут проектирования.
3. При разработке КНИ КМОП ИМС с повышенной стойкостью к дозовым эффектам достаточно использовать транзисторы А-типа в качестве основного топологического варианта, транзисторы Н-типа – в случаях, когда требуется наличие независимого контакта к телу, при этом от других топологических вариантов можно полностью отказаться.

Научная новизна диссертации:

1. Выявлены наихудшие электрические режимы при облучении, в зависимости от геометрии канала и от особенностей создания контактов к телу КНИ транзистора.
2. Определены наиболее эффективные (с точки зрения функционального назначения элемента) топологические методы борьбы с дозовыми эффектами в КНИ КМОП ИМС.
3. Предложена математическая модель, позволяющая получить SPICE-параметры КНИ транзисторов А- и Н-типа, наиболее широко используемых при проектировании КНИ КМОП ИМС. Модель позволяет учесть влияние контактов к телу

КНИ транзистора на статические и динамические характеристики транзистора.

4. Предложен способ схемотехнического моделирования дозовых эффектов на уровне ИМС, учитывающий электрический режим при облучении каждого составляющего ИМС транзистора в широком диапазоне значений накопленной дозы.

Практическая значимость диссертации заключается в следующем:

1. Выработаны конкретные рекомендации по оптимизации технологического процесса и топологии; определен наилучший электрический режим при облучении для различных компонентов тока утечки.
2. Проведённое экспериментальное исследование чувствительности к дозовым эффектам элементов КНИ КМОП ИМС с различной топологической реализацией позволило при разработке ИМС выбрать наиболее эффективное топологическое решение, в зависимости от функционального назначения элемента или блока.
3. С помощью предложенной математической модели получены SPICE-параметры А- и Н-транзисторов 0,5 мкм и 0,35 мкм КНИ КМОП технологии. Ошибка при моделировании не превышает 15%. Достигаемая точность расчёта является удовлетворительной для цифровых ИМС.
4. Разработанное программное средство схемотехнического моделирования позволяет учесть дозовые эффекты на этапе схемотехнического проектирования устройства, с учётом технологических особенностей и электрического режима при облучении в широком диапазоне значений накопленной дозы.
5. Учёт электрического режима для каждого составляющего ИМС элемента позволяет выявить входные вектора «наихудшего случая» и проводить моделирование усиления разброса параметров элементов, вызванного радиационным воздействием.
6. Предложенные методы схемотехнического моделирования дозовых эффектов позволяют проводить сравнение эффективности схемотехнических решений, призванных повысить радиационную стойкость.
7. Все предложенные методы и программные средства интегрированы в стандартный маршрут проектирования и поддерживаются современными коммерческими САПР.

Результаты диссертации внедрены в НИИ системных исследований РАН при разработке СБИС микропроцессора «КОМДИВ32-Р» и системы

на кристалле «РЕЗЕРВ-32», выполненных по 0,35 мкм КНИ КМОП технологии. Предложенное программное средство для моделирования дозовых эффектов принято к регистрации в ФГУ «Федеральный институт промышленной собственности Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам».

Апробация результатов диссертации. Основные результаты диссертации докладывались на ежегодных Научных сессиях МИФИ (2006-2010); ежегодных всероссийских конференциях «Радиационная стойкость» (Лыткарино, 2006, 2009); Всероссийской конференции «Многомасштабное моделирование процессов и структур в нанотехнологиях» (ММПЧН-2008); Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов (Зеленоград, 2006); Международной конференции "International Conference on Micro- and Nanoelectronics" (ICMNE, 2007, 2009); Европейской конференции по микроэлектронике MIEL (2008); ежегодных Европейских конференциях RADECS (2006, 2008).

Опубликованные результаты. По теме диссертации опубликовано 2 статьи в российских научно-технических журналах, рекомендованных ВАК; 1 статья в международном журнале; 5 статей в рецензируемых научно-технических сборниках трудов международных конференций (Proceedings of SPIE, MIEL, RADECS); 16 тезисов докладов в сборниках российских научных конференций.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации – 151 страница. Диссертация содержит 110 рисунков. Список литературы содержит 85 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение

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

1. Многоуровневое моделирование дозовых эффектов в приборах КНИ КМОП технологии

Проектирование СБИС является многоуровневым процессом, каждый уровень характеризуется своим математическим обеспечением, используемым для моделирования и анализа схем. Выделяют уровни системный, регистровый, логический, схмотехнический, приборно-технологический (компонентный, физический). Для каждого уровня существует своя система моделирования. Так, для схмотехнического моделирования широко используется SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis). В полупроводниковой индустрии используется несколько десятков программ схмотехнического моделирования.

На приборно-технологическом (физическом) уровне моделируются характеристики отдельных приборов и структур: профили легирования, электрические характеристики и их зависимость от вариаций технологического процесса. Эти задачи обычно решаются с помощью двух- и трёхмерного моделирования, осуществляемого программами типа TCAD. Методы моделирования дозовых эффектов с помощью TCAD представлены в работах Петросянца К.О., Харитонов И.А., Niclaw С.Ј. и др. Такой подход даёт точный результат, однако является требовательным к временным затратам и вычислительным ресурсам, а также требует специальных навыков от оператора. При этом проблема передачи полученных данных на схмотехнический уровень остаётся нерешённой. В настоящее время ни одна из существующих общедоступных моделей схмотехнического уровня, поддерживаемых коммерческими симуляторами, не имеет встроенных средств моделирования радиационных эффектов. Таким образом, разработчику необходимы методы и средства для адекватного прогнозирования деградации характеристик, вызванной воздействием стационарного ионизирующего излучения, позволяющий сохранять приемлемую точность расчётов на схмотехническом уровне и не требующий от разработчика специальных навыков в области повышения радиационной стойкости ИМС.

Радиационно-индуцированные токи утечки, обусловленные встраиванием положительного заряда в слоях изоляции, являются наиболее значи-

мой проблемой повышения радиационной стойкости современных субмикронных КМОП ИМС. Для определения направления оптимизации техпроцесса и/или топологии, а также для получения параметров для моделирования необходимо разделить боковую и донную составляющие радиационно-индуцированных токов утечки в КМОП КНИ ИМС. Т.к. ток утечки сильно зависит от электрического режима при облучении и от геометрии канала, необходимо разработать специализированные тестовые структуры, позволяющие в значительной мере подавить или полностью исключить ту или иную составляющие тока утечки.

Для разделения составляющих утечки исследуются передаточные ВАХ верхнего (основного) и нижнего транзисторов.

Донный ток утечки представляет собой ток в канале нижнего транзистора, следовательно, этот ток управляется нижним затвором и не управляется верхним. Ток, обусловленный влиянием боковой изоляции, в той или иной мере зависит как от напряжения на верхнем затворе, так и от напряжения на нижнем затворе. Степень зависимости определяется локализацией паразитной транзисторной структуры: верхний затвор эффективно управляет транзисторными структурами в верхней части изоляции, нижний затвор – структурами в глубинной части.

Таким образом, можно сформулировать общие правила анализа ВАХ для разделения составляющих тока утечки:

1. Получить передаточные ВАХ, измеренные при малом напряжении на стоке ($V_{DS} \sim 0,1 \text{ В}$), верхнего и нижнего транзисторов;
2. Измерить значение тока стока верхнего транзистора при $V_{GS} = 0 \text{ В}$ (ток утечки). Отметить, приходится это значение на излом или на подпороговую часть ВАХ (с экспоненциальной зависимостью от напряжения затвор-исток) основного транзистора. В первом случае утечка либо боковая, либо донная. Во втором случае утечка обусловлена сдвигом ВАХ как целого вследствие радиационно-индуцированного изменения порогового напряжения из-за встраивания положительного заряда в подзатворном оксиде;
3. Определить, на какой участок ВАХ нижнего транзистора приходится ток утечки. Если значение приходится на подпороговую часть ВАХ нижнего транзистора до возникновения изломов (если таковые имеются), то преобладает донная утечка. Если значение приходится на излом или подпороговую часть паразитной структуры, преобладает боковая утечка.

На краевую утечку оказывает влияние целый ряд факторов: геометрия боковой стенки STI и переходных областей от тонкого подзатворного оксида к изолирующему и от изолирующего оксида к скрытому, особенности технологии изготовления изоляции, электрические режимы при облучении. Требовательность к вычислительным ресурсам, сложность освоения и высокая цена программного обеспечения для моделирования дозо-

вых эффектов также являются факторами, ограничивающими применение данных продуктов.

Несмотря на упомянутые выше факторы, оказывается возможным качественно и количественно оценить величину токов утечки в зависимости от дозы, определить положение областей, оказывающих наибольшее влияние на утечку, и выработать рекомендации по повышению стойкости структуры.

Ток через паразитный канал можно представить в виде суммы токов через большое количество транзисторов малой ширины, каждый из которых имеет свою толщину оксида, пороговое напряжение, накопленный заряд в оксиде и т.п. Данный подход к моделированию токов утечки представлен в работах Brisset C., Ferlet-Cavrois V., Flament O., Musseau O., Le-ray J.L. и др.

В данной работе для физического моделирования дозовых эффектов используется модель, предложенная в работах Зебрева Г.И. и Горбунова М.С. Проводится двумерное моделирование структуры с изоляцией произвольной формы, причём для получения распределения накопленного заряда, локального порогового напряжения и плотности токов утечки не требуется привлечения дополнительных программных средств. Особенностью модели является учёт эффекта нейтрализации захваченного положительного заряда радиационно-индуцированными электронами (RICN-эффект, описанный в работах Fleetwood D.M. и др.).

Можно считать, что длина паразитных транзисторов совпадает с длиной основного транзистора, а ширина определяется требуемой точностью:

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

где $i(V_{GS} - V_T, V_{DS})$ вычисляется по компактной модели МОП-транзистора, V_{GS} , V_{DS} , V_T – напряжения на затворе, стоке и пороговое напряжение соответственно, Δx – ширина элементарного паразитного транзистора, N – число паразитных транзисторов.

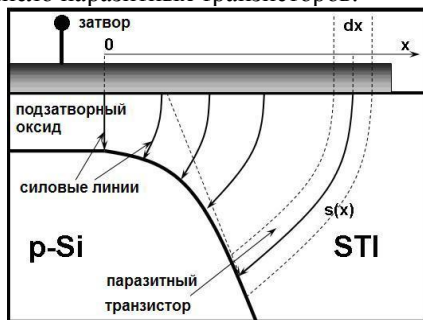


Рисунок 1 – Моделируемая структура

Пороговое напряжение рассчитывается для основного и каждого из паразитных транзисторов как функция эффективной длины силовой линии электрического поля, которая принимается равной длине собирания радиационно-индуцированных дырок $s(x)$ (см. рис. 1). Принятое допущение правомерно благодаря безынерционному характеру движения дырок в оксиде (подвижность дырок в SiO_2 составляет $10^{-5} \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$). Эффективная толщина оксида паразитного транзистора $s(x)$ параметризована как функция расстояния x от верхнего края изолирующего оксида. Эта функция может быть получена исходя из данных о структуре.

В частности, при расчёте может быть использована линейная зависимость:

$$s(x) = d_{ox} + \alpha x, \quad (2)$$

где d_{ox} – физическая толщина подзатворного диэлектрика, α – угол, который составляют стенки изолирующей канавки с поверхностью Si (для STI $\alpha \approx 75^\circ..85^\circ$).

Пороговое напряжение рассчитывается по формуле:

$$V_T(x, D) = V_{T0}(x, D=0) - \frac{Q_{ot}(x, D)}{\epsilon_0 \epsilon_{ox}} s(x), \quad (3)$$

где $V_{T0}(x, D=0)$ – локальное пороговое напряжение до облучения, которое при расчётах для 0,5 мкм КНИ КМОП технологической линии НИИСИ РАН принималось равным $0.8 \text{ В} + Q_{SUB}(s(x) - t_{ox})/\epsilon_0 \epsilon_{ox}$, Q_{SUB} – заряд обеднённой области.

Величина накопленного заряда в оксиде рассчитывается по формуле:

$$Q_{ot}(x, D) = \frac{q F t}{\sigma_n \epsilon_{ox}} \frac{s(x)}{\Delta x_{ecoll}} \times \left(1 - \exp\left[-\sigma_n \epsilon_{ox} \eta_{eff} \epsilon_{ox} K_g \Delta x_{ecoll} D\right] \right). \quad (4)$$

Была проведена экспериментальная проверка адекватности предложенной модели. Тестовые транзисторы были изготовлены по 0,5 мкм КНИ КМОП технологической линии НИИСИ РАН.

На рисунке 2 представлена дозовая зависимость тока утечки. Экспериментальные данные и результаты моделирования наглядно демонстрируют эффект насыщения токов утечки с увеличением дозы.

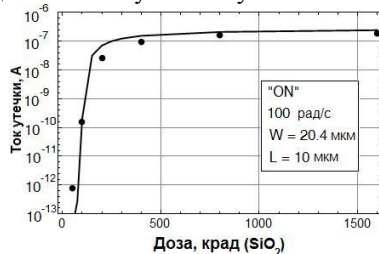


Рисунок 2 – Дозовая зависимость тока утечки

Для ИМС, содержащих более сотни транзисторов, подключение паразитных элементов непосредственно на схеме крайне трудоёмко и, кроме того, сильно затрудняет восприятие схемы в целом, что особенно важно при разработке аналоговых и смешанных (аналого-цифровых) ИМС. Решение задачи получения SPICE-параметров эквивалентного паразитного МОП-транзистора вытекает из результатов моделирования на физическом уровне. Представлена методика получения SPICE-параметров эквивалентного паразитного транзистора.

Для повышения эффективности разработки инструмент моделирования дозовых эффектов должен быть встроен в стандартный маршрут проектирования. Большинство современных SPICE-совместимых программ-симуляторов поддерживает использование подсхем (subcircuits). Подсхемы задаются в теле файлов, содержащих SPICE-модели. Таким образом, никаких изменений в принципиальной схеме не производится, а модификация входного файла (нетлиста) производится автоматически.

2. Конструктивно-топологические решения для ИМС, применяемых в условиях воздействия ионизирующего излучения

Для создания КНИ транзисторов может использоваться стандартная топология, однако, из-за наличия скрытого оксида, в этом случае невозможно создать контакт к телу транзистора. Цифровые схемы на основе таких транзисторов с плавающим телом имеют повышенную скорость и меньшую занимаемую площадь. Однако присущие транзисторам F-типа эффекты плавающего тела усложняют моделирование ИМС и, кроме того, делают эти транзисторы более чувствительными к радиационным эффектам. В рамках КНИ КМОП технологии существуют топологические решения, позволяющие значительно повысить радиационную стойкость по сравнению со стандартной топологией. Используются 2 основных варианта реализации контакта к телу: с жёсткой привязкой тела к истоку (транзисторы А-типа) и с возможностью произвольной коммутации тела (транзисторы Н-типа). К преимуществам транзисторов А-типа относятся отсутствие кинк-эффекта и минимизация биполярного эффекта. Наличие двух боковых контактов к телу приводит к увеличению площади, однако позволяет полностью блокировать протекание тока вблизи боковых областей, что очень важно для уменьшения радиационно-индуцированных токов утечки.

Компактное моделирование транзисторов с нестандартной формой затвора основывается на точном определении эффективных ширин W и длин L каналов прибора, т.к. ключевые электрические параметры зависят от эффективного соотношения W/L . Для специальных топологических решений задача определения ширины и длины канала является более сложной, по сравнению со стандартной (линейной) топологией. Методы вычисления эффективной ширины и длины канала для используемых в

объемной КМОП технологии нестандартных топологических вариантов рассмотрены в работах McLain M., Campola M., Sanchez Esqueda I., Barnaby H. J., Anelli G., Faccio F., Nowlin R.N. и др.

В данной работе предложена математическая модель, позволяющая получить SPICE-параметры КНИ транзисторов А- и Н-типа и учесть влияние контактов к телу на характеристики.

Из рис. 3 видно, что из-за необходимости создания независимого контакта к телу, помимо основной части активного прибора, в Н-транзисторах существуют «паразитные» пути протекания тока, показанные стрелкой, эффективная ширина канала W_{eff} отличается от ширины задаваемой «средней» частью Н-образного затвора, обозначенной на рис. 3 как W . Различие между W_{eff} и W можно учесть с помощью сравнения крутизны (подвижности) Н-транзисторов с одинаковой длиной и разной шириной. При этом транзистор с наибольшей шириной является «опорным», т.к. при значениях ширины канала много большей суммарной ширины «боковых затворов» ($W \gg 1$ мкм) влиянием паразитных областей можно пренебречь.

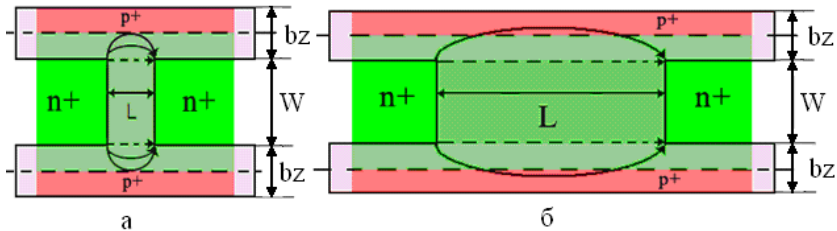


Рисунок 3 – Пути протекания тока в Н-транзисторах с различной длиной

Крутизны транзистора рассчитывается по формуле:

$$g_m = \frac{\partial I_{ds}}{\partial V_{gs}} = \mu \cdot C_{ox} \cdot \frac{W}{L} V_{ds}, \quad (5)$$

где μ – подвижность, $C_{ox} = \epsilon_i \epsilon_0 / d_{ox}$ – удельная емкость оксида толщиной d_{ox} , W , L – ширина и длина канала, V_{gs} – напряжение затвор-исток, V_{ds} – напряжение сток-исток, I_{ds} – ток стока.

Для расчета поправки к ширине канала ΔW в формулу (5) необходимо подставить значения крутизн, рассчитанные из экспериментальных данных, для различных длин и ширин канала. Из отношения крутизны «опорного» транзистора к крутизне транзистора, для которого ищется поправка, (при одинаковых длинах канала) выражаем искомую поправку:

$$\Delta W = \frac{W_0 \cdot g_{mH}}{g_{mH0}} - W, \quad (6)$$

где W , g_{mH} – ширина и крутизна транзистора, для которого считается поправка, W_0 , g_{mH0} – ширина и крутизна «опорного» транзистора.

Для нахождения зависимости поправки от длины канала производится усреднения величины поправки для транзисторов с одинаковой длиной. На рис. 4 показана экспериментальная зависимость поправки от длины канала Н-транзистора. Зависимость, представленная на рис. 4, была аппроксимирована функцией натурального логарифма:

$$\Delta W \cong A \cdot \ln(L[\mu\text{м}]/10^{-6}[\mu\text{м}]) + B, \quad (7)$$

где A и B – коэффициенты, зависящие от особенностей технологии. Для экспериментальных данных по 0,5 мкм КНИ КМОП технологии НИИСИ РАН $A=0,13$, $B=0,14$.

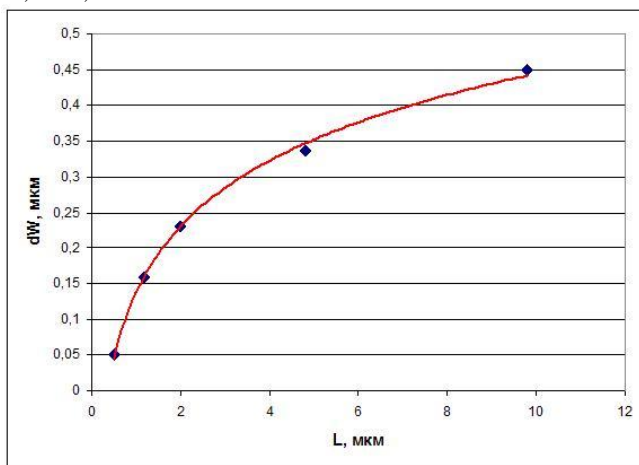


Рисунок 4 – Зависимость поправки от длины канала для Н-транзистора: точки – рассчитанные значения поправки, линия – аппроксимирующая функция

Формула (7) справедлива для длин канала от 0,5 мкм до 10 мкм, что полностью охватывает диапазон используемых значений длины при проектировании Н-транзисторов по технологии 0,5 мкм. Максимальная поправка ограничивается удвоенной шириной «боковых» частей Н-образного затвора (на рисунке 3 обозначены как «bz»).

Из рис. 5 видно, что из-за наличия контактов к телу в А-транзисторах путь протекания тока изменяется. Это приводит к тому, что эффективная ширина канала отличается от топологических значений ширины затвора, причём вносимые поправки в эффективную ширину зависят от длины канала: чем больше длина, тем меньше значение поправки.

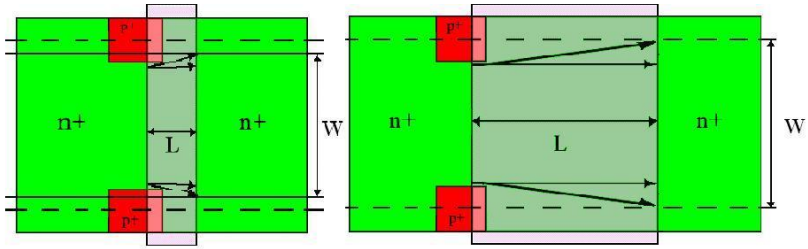


Рисунок 5 – Пути протекания тока в А-транзисторах с различной длиной

Аналогично расчетам, проводившимся для Н-транзистора, проведены расчеты для А-транзистора. Поправка для А-транзистора находится по формуле:

$$\Delta W = W - \frac{W_0 \cdot g_{mA}}{g_{mA0}}, \quad (8)$$

где W , g_{mA} - ширины и крутизна транзистора, для которого считается поправка W_0 , g_{mA0} - ширина и крутизна «опорного» транзистора.

На рис. 6 приведена зависимость поправки от длины канала.

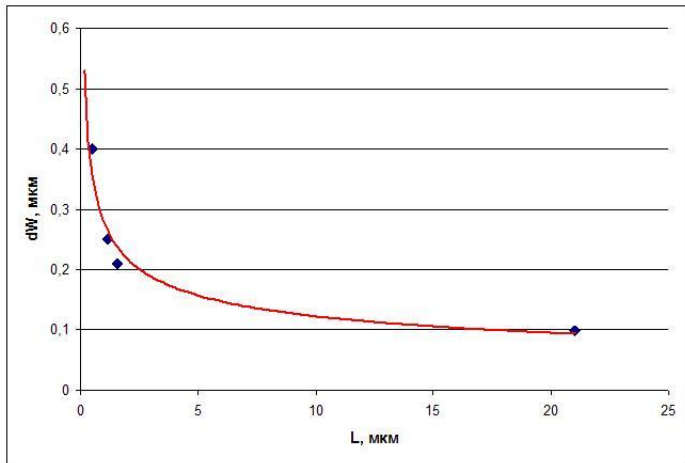


Рисунок 6 – Зависимость поправки от длины канала для А-транзистора: точки – рассчитанные значения поправки, линия – аппроксимирующая функция

Зависимость, представленная на рисунке 6, была аппроксимирована степенной функцией:

$$\Delta W \cong A \cdot (L[\mu\text{m}]/10^{-6}[\mu\text{m}])^B, \quad (9)$$

где A и B – коэффициенты, зависящие от особенностей технологии. Для экспериментальных данных по 0,5 мкм КНИ КМОП технологии НИИСИ РАН $A=0,28$, $B=-0,36$.

Формула (9) справедлива для длин канала от 0,5 мкм до 21 мкм, что полностью охватывает диапазон используемых значений длины при проектировании А-транзисторов по технологии 0,5 мкм.

В связи с тем, что в транзисторах А-типа контакт к телу жёстко связан с истоком, определить параметры влияния потенциала тела на характеристики прибора напрямую невозможно. Однако, в связи с тем, что активные области Н- и А-транзисторов практически не отличаются друг от друга, для модели А-транзисторов можно использовать некоторые параметры, полученные для Н-транзисторов. Таким образом, получение SPICE-параметров должно производиться в 3 этапа. На первом этапе получается полный набор SPICE-параметров для Н-транзисторов. На втором этапе производится получение тех параметров транзисторов А-типа, для которых нет необходимости в данных о токе тела или потенциала тела (пороговое напряжение, подвижность и др.). На третьем этапе производится коррекция полученных наборов для наилучшего соответствия результатов моделирования экспериментальным данным.

В транзисторах нестандартной топологии важнейшую роль играет образуемая участками поликремниевого затвора паразитная МОП-ёмкость. Эту ёмкость можно моделировать с помощью подсхем (subcircuits), представляющих собой МОП-транзисторы, подключённые между затвором и стоком/истоком основного транзистора.

Предложенная аналитическая модель была успешно опробована на технологиях 0,35 мкм и 0,5 мкм КНИ КМОП технологической линии НИИСИ РАН. Результаты сравнения измеренной частоты кольцевых генераторов (на транзисторах А- и Н-типа) с результатами моделирования показывают, что ошибка моделирования находится в пределах 12-15%, что является достаточным для большинства цифровых ИМС.

3. Экспериментальное исследование чувствительности элементов КНИ КМОП ИМС к дозовым эффектам

В настоящее время проведены многочисленные исследования радиационной стойкости коммерческих КНИ КМОП технологий и определены наилучшие электрические режимы при облучении. Данной проблеме посвящены работы Ferlet-Cavrois V., Colladant T., Paillet P., Leray J.L., Barnaby H.J. и др. Однако для повышения эффективности разработки необходимо провести сравнительный анализ влияния режима при облучении на стойкость приборов с различными вариантами топологической реализации.

Для повышения эффективности экспериментальных исследований необходимо:

1. Скорректировать методику измерений для исключения влияния радиационных эффектов на результаты и их интерпретацию;

2. Скорректировать методику испытаний для обеспечения всех основных электрических режимов при облучении;
3. Выработать требования к составу тестовых структур для обеспечения нахождения всех необходимых для физического и схемотехнического моделирования параметров, а также для изучения влияния геометрии канала на дозовую деградацию.

Решение поставленных задач имеет своей целью определить наиболее эффективный (с точки зрения скорости, занимаемой площади и радиационной стойкости) топологический вариант реализации элемента для данного функционального назначения в разрабатываемой ИМС.

Облучение тестовых структур производилось до уровня 3,8 Мрад (Si) при комнатной температуре с мощностью дозы ~ 100 рад (Si)/с с использованием источника γ -излучения. Электрические режимы при облучении указаны в Таблице 1.

Таблица 1 – Электрические режимы при облучении

Потенциал, В	TGB	ONB	OFB	TG	ON	OFF
Верхний затвор, V_{FG}	0	+3.3	0	0	+3.3	0
Исток, V_S	+3.3	0	0	+3.3	0	0
Сток, V_D	+3.3	0	+3.3	+3.3	0	+3.3
Тело (в транзисторах Н-типа), V_B	0	0	0	0	0	0
Нижний затвор (подложка), V_{BG}	-3.3	-3.3	-3.3	0	0	0

Размеры тестовых транзисторов выбирались исходя из требований необходимого набора SPICE-параметров, а также из задачи качественного определения влияния длины и ширины канала на стойкость транзистора к дозовым эффектам.

Для каждой структуры были получены передаточные ВАХ как верхнего, так и нижнего транзистора. По результатам испытаний сделаны следующие основные выводы:

1) В транзисторах с плавающим телом преобладает боковая утечка, которая становится значительной (порядка $10^{-8} - 10^{-7}$ А) уже при 100 крад (Si). Донная утечка преобладает в А-, Н- и кольцевых транзисторах и проявляется при значениях накопленной дозы 1-2 Мрад (Si).

2) Приложение отрицательного напряжения к подложке не влияет на сдвиг порогового напряжения и деградацию подвижности в транзисторах с контактом к телу. В режимах “TGB” и “OFB” отрицательное напряжение увеличивает донную утечку, однако это увеличение незначительно. Таким образом, рекомендовано заземлять подложку ИМС в штатном режиме.

3) Наихудшие режимы для сдвига порогового напряжения – “ON” (“ONB”) и “TG” (“TGB”) для всех вариантов топологической реализации. Наихудший режим для донной утечки – “ON” (“ONB”), но в случае короткоканальных транзисторов в режиме “OFF” и “TG” утечка становится значительной уже при 800 крад (Si). Эффект обусловлен различием в распределении электрического поля в скрытом оксиде в короткоканальных ($L/t_{\text{BOX}} \sim 1$) и длинноканальных ($L/t_{\text{BOX}} \gg 1$) транзисторах. Следовательно, при проектировании определение длины канала транзистора обуславливается компромиссом между радиационной стойкостью (увеличение длины канала препятствует возникновению донной утечки), занимаемой площадью и производительностью ИМС.

С точки зрения образования утечки транзисторы А-типа являются наиболее предпочтительным топологическим вариантом при проектировании радиационно-стойких ИМС. Стойкость транзисторов Н-типа к дозовым эффектам не ниже стойкости транзисторов А-типа, однако наличие значительных паразитных емкостей ограничивает применение транзисторов Н-типа случаями, когда тело должно быть независимо от истока (ключи, схемы ввода/вывода и т.п.). Для применений в условиях больших значений накопленной дозы (более 1 Мрад (Si)) n-канальные Н-транзисторы по возможности должны заменяться р-канальными.

Таким образом, в КНИ КМОП ИМС необходимо использовать транзисторы А- и Н-типа, а от других топологических вариантов, ввиду свойственных им недостатков, можно полностью отказаться.

4. Схемотехническое моделирование дозовых эффектов в ИМС

В течение прошедших нескольких лет было предложено несколько концепций моделирования радиационных эффектов. В большинстве случаев такие концепции базируются на VHDL-AMS или другом HDL моделировании радиационно-индуцированной деградации характеристик путём включения в модель дозовых зависимостей основных параметров подсистем. Данные концепции предложены в работах Mikkola E., Vermeire B., Chiu T., Barnaby H., Parks H.G., De Cock W., Versmissen H. И др. Дозовые зависимости обычно получаются из данных по радиационным испытаниям чипа в целом. Главным недостатком этих инструментов является практическая невозможность учёта зависимости радиационной деградации от электрического режима при облучении, т.к. используемые полумпирические зависимости не обладают должной гибкостью: тестовые структуры не могут быть испытаны во всех возможных электрических режимах.

Другой важной проблемой разработки радиационно-стойкой аппаратуры является увеличение рассогласования параметров, обусловленное различием электрических режимов при воздействии ИИ. Явления рассогласования и технологического разброса параметров хорошо изучено, од-

нако в настоящее время опубликовано мало работ по проблеме радиационно-индуцированного рассогласования. Исследования в этой области проведены в работах Pelgrom M.J.M., Duinmaijer A.C., Faccio F.

Проблема состоит в том, чтобы перенести дозовые зависимости в SPICE-модели. Решение может состоять в непосредственном получении параметров для каждой дозы. Этот метод предполагает наличие большого количества экспериментальных данных и характеризуется длительным временем, затрачиваемым на процедуру получения параметров. Другим недостатком этого метода является переоценка деградации параметров при больших значениях накопленной дозы.

Разработан метод схемотехнического моделирования дозовых эффектов в КНИ КМОП ИМС. Встраивание физической модели в стандартную программу-симулятор невозможно, поэтому ключевым пунктом предлагаемой методологии является интеграция физической модели со SPICE-моделью, реализованной на языке описания аппаратуры HDL. В частности, описания на Verilog-A (Verilog-AMS) поддерживаются широко используемыми симуляторами (например, Cadence Spectre). Таким образом, разработчик радиационно-стойких ИМС может использовать привычную среду моделирования, в то время как симулятор интерпретирует каждый транзистор как подсхему, которая задаёт и «радиационные», и SPICE-параметры элементу, определённому на HDL.

К сожалению, наборы средств проектирования (DesignKits) для коммерческих КМОП технологий не всегда содержат параметры для моделирования рассогласования и технологического разброса. Однако если такие данные предоставляются разработчику, для увеличения выхода годных рекомендуется включать статистическое (Монте-Карло) моделирование этих эффектов.

Получение дозовых зависимостей многих параметров ИМС практически невозможно из-за сложности необходимого оборудования. Эти зависимости могут быть получены с помощью разработанного программного средства, представляющего собой Verilog-A описание физической модели дозовых эффектов, встроенной в описание компактной модели транзистора BSIM3v3.

Предложенный метод моделирования дозовых эффектов на схемотехническом уровне состоит в следующем. В файле с моделями транзисторов описываются подсхемы (subcircuits) для каждой модели. Подсхема представляет собой описание схемотехнических параметров транзистора и объявление основного элемента, тип которого соответствует названию модуля, описанного на Verilog-A (см. листинг 1).

Листинг 1 – Подсхема, описывающая транзистор nmos_tn как Verilog-A модуль bsim3mos_rad

```
inline subckt nmos_tn ( d g s b )
parameters w=1E-7 l=1E-7 as=0 ad=0 ps=0 pd=0 nrd=0 nrs=0
...
nmos_tn ( d g s b ) bsim3mos_rad W=w L=l AD=ad AS=as PD=pd PS=ps
NRD=nrd NRS=nrs DOSE=dose RADMODE=radmode VGIRR=vgirr
+ TYPE=1
+ LMIN=1.8E-007          LMAX=3.5E-007          WMIN=2.2E-007
+ WMAX=6E-007           VERSION=3.3           MOBMOD=1
...
ends nmos_tn
```

К схемотехническим параметрам транзистора (длине и ширине канала, площадям и периметрам стоков и истоков и т.п.) добавляются параметры моделирования дозовых эффектов: режим моделирования (“radmode”), напряжение на затворе при облучении vgirr (для режима 1) и значение накопленной дозы (“dose”).

Предусмотрено 2 режима моделирования:

1. Предполагается, что все транзисторы в схеме облучаются в одном режиме, устанавливаемом параметром “vgirr”.
2. Для каждого транзистора электрический режим при облучении устанавливается первой точкой анализа: начальным значением напряжения при анализе по постоянному току (DC-анализе), значением напряжения при t=0 при анализе во временной области (transient) или значением рабочей точки в малосигнальном анализе (AC-анализе).

Первый режим используется при калибровке параметров физической модели по экспериментальным дозовым зависимостям и ВАХ. Рекомендуется для проведения DC-анализа.

Второй режим является основным и используется для оценки радиационной стойкости ИМС различной сложности.

Важным преимуществом данного метода является то, что в схеме не производится никаких изменений. Таким образом, инструмент встроен в стандартный маршрут проектирования и к навыкам проектировщика не предъявляется никаких специальных требований.

Учёт электрического режима для каждого составляющего ИМС элемента позволяет выявить входные вектора «наихудшего случая» для библиотеки элементов и проводить моделирование усиления разброса параметров элементов, вызванного радиационным воздействием.

Метод может быть использован как при проектировании новых ИМС, так и для оценки радиационной стойкости уже разработанных блоков.

Для моделирования были использованы экспериментальные данные по стойкости элементов 0,18 мкм КМОП технологии УМС к дозовым эффектам

там. Полученные параметры физической модели были применены к модели 0,18 мкм КМОП технологии Chartered Semiconductor, позволяющей создавать стандартные (с тонким оксидом, “TN”) и 3-вольтовые (с толстым оксидом, “TK”) транзисторы. Необходимо отметить, что толщина подзатворного диэлектрика t_{ox} 3-вольтовых транзисторов примерно равна t_{ox} транзисторов, созданных по технологии с проектными нормами 0,35 мкм.

Рассмотрены основные виды анализа и приведены результаты моделирования для нескольких типов аналоговых и цифровых ИМС: промоделированы дозовые зависимости вариаций порогового напряжения транзисторов и температурной зависимости источника опорного напряжения типа bandgap (DC анализ); получены дозовые зависимости частоты и скважности кольцевых генераторов; получены дозовые зависимости параметров упрощённой схемы двухкаскадного операционного усилителя: собственного коэффициента усиления, произведения усиления на частоту (gain-bandwidth product) и запаса по фазе. Результаты моделирования подтвердили вывод о том, что в современных субмикронных КМОП технологиях сдвиг порогового напряжения и деградация крутизны не приводит к значительным ухудшениям характеристик ИМС. В то же время, из-за различия в электрических режимах при облучении и технологического разброса параметров разность пороговых напряжений КНИ транзисторов с проектной нормой 0,35 мкм может достигать 250 мВ, что может серьёзно повлиять на характеристики разрабатываемых ИМС.

Заключение

Основной научный результат диссертации заключается в создании и развитии методов моделирования КНИ КМОП ИМС с повышенной стойкостью к дозовым эффектам.

Основной теоретический результат:

Разработан метод схемотехнического моделирования дозовых эффектов на уровне ИМС, учитывающий электрический режим при облучении каждого составляющего ИМС транзистора в широком диапазоне значений накопленной дозы и позволивший на этапе проектирования рассчитывать деградацию характеристик в условиях воздействия ионизирующего излучения.

Частные теоретические результаты:

1. Разделение боковой и донной составляющих токов утечки позволило локализовать утечку, выработать рекомендации по оптимизации топологии и определить наихудший электрический режим при облучении для различных компонентов тока утечки.

2. Обосновано применение МОП транзисторов А- и Н-типа, в зависимости от функционального назначения элемента, при проектировании радиационно-стойких КНИ КМОП ИМС.
3. Предложена математическая модель, позволяющая получить SPICE-параметры транзисторов А- и Н-типа, наиболее широко используемых при проектировании КНИ КМОП ИМС.

Основной практический результат

Разработано полностью интегрированное в стандартный маршрут проектирования и полностью совместимое с современными коммерческими САПР программное средство, позволяющее учитывать влияние дозовых эффектов на этапе схемотехнического проектирования, перехода от моделирования отдельного прибора к моделированию характеристик ИМС. Предложенное программное средство для моделирования дозовых эффектов принято к регистрации в ФГУ «Федеральный институт промышленной собственности Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам».

Частные практические результаты диссертации заключается в следующем:

1. Проведено экспериментальное исследование чувствительности к дозовым эффектам элементов КНИ КМОП ИМС. В результате исследования выявлены наихудшие электрические режимы при облучении для различных топологических вариантов реализации транзисторов.
2. При разработке КНИ КМОП ИМС с повышенной стойкостью к дозовым эффектам основным вариантом топологической реализации должен быть транзистор А-типа. Транзисторы Н-типа должны быть использованы только в случаях, когда требуется обеспечить независимость тела от истока: в ключах, элементах схем ввода/вывода и т.п., при этом от других топологических вариантов можно полностью отказаться.
3. Предложенная математическая модель позволила получить SPICE-параметры для транзисторов А- и Н-типов, учесть влияние контактов к телу на статические и динамические характеристики транзисторов. Достижимая точность расчёта является удовлетворительной для цифровых ИМС: ошибка не превышает 10-15%. Модель была использована в НИИ системных исследований РАН при разработке СБИС микропроцессора «КОМДИВ32-Р» и системы на кристалле «РЕЗЕРВ-32».

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Горбунов М.С., Зебрев Г.И., Осипенко П.Н., Моделирование радиационно-индуцированной утечки в элементах КНИ КМОП технологии. // Вопросы атомной науки и техники, серия «Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру», выпуск 4, стр. 6-10, Москва, 2009.
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.

Статьи и материалы конференций

1. Горбунов М.С., Хахаев А.В., Моделирование радиационно-индуцированных токов утечки в транзисторах субмикронной КМОП технологии. // Тезисы докладов 13-й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов, стр. 71., Зеленоград, 2006.
2. Горбунов М.С., Хахаев А.В., Зебрев Г.И., Моделирование токов утечки в транзисторах КМОП технологии при радиационном воздействии. // Научная сессия МИФИ-2006, сборник научных трудов конференции «Молодёжь и наука», том 16, стр. 72-73, Москва, 2006.
3. Третьяченко Т.И., Ватутина К.С., Горбунов М.С., Зебрев Г.И., Разработка программы для экстракции параметров системы моделей BSIM 3v3 для целей прогнозирования радиационного отклика микросхем. // Научная сессия МИФИ-2006, сборник научных трудов конференции «Молодёжь и наука», том 16, стр. 74-75, Москва, 2006.
4. Горбунов М.С., Кашуба М.Ю., Зебрев Г.И., Разброс параметров транзисторов в современных КМОП СБИС. // Научная сессия МИФИ-2006, сборник научных трудов конференции «Молодёжь и наука», том 16, стр. 76-77, Москва, 2006.
5. Зебрев Г.И., Горбунов М.С., Хахаев А.В., Моделирование радиационно-индуцированных краевых токов утечки в элементах КМОП технологий. // «Стойкость-2006», НИИП, 2006.
6. Горбунов М.С., Зенин И.А., Зебрев Г.И., Разработка программного модуля для расчёта токов утечки в транзисторах КНИ КМОП

- технологии при радиационном воздействии. // Научная сессия МИФИ-2007, сборник научных трудов конференции «Молодёжь и наука», том 17, стр. 49, Москва, 2007.
7. Горбунов М.С., Зебрев Г.И., Моделирование токов утечки в транзисторах субмикронных КМОП технологий при импульсном воздействии. // Научная сессия МИФИ-2007, сборник научных трудов, том 1, стр. 59-60, Москва, 2007.
 8. Горбунов М.С., Шунков В.Е., Ильягуев В.Н., Осипенко П.Н., Разработка радиационно-стойких аналоговых схем на «цифровой» КНИ КМОП технологии. // Научная сессия МИФИ-2007, сборник научных трудов, том 1, стр. 71-72, Москва, 2007.
 9. Бочаров Ю.И., Гуменюк А.С., Симаков А.Б., Горбунов М.С., Шунков В.Е., Поляков А.В., Анализ методов построения и разработка КМОП БИС аналого-цифровой многоканальной «системы на кристалле». // Научная сессия МИФИ-2007, сборник научных трудов, том 1, стр. 111-112, Москва, 2007.
 10. Горбунов М.С., Шнайдер А.И., Петрова М.М., Зебрев Г.И., Экстрактор радиационно-чувствительных параметров BSIMSOI для симулятора SPECTRE. // Научная сессия МИФИ-2008, сборник научных трудов, том 8, стр. 131-132, Москва, 2008.
 11. Зебрев Г.И., Горбунов М.С., Многоуровневое моделирование радиационных эффектов в специализированных интегральных схемах. // Сборник тезисов докладов I Всероссийской конференции «Многомасштабное моделирование процессов и структур в нанотехнологиях», стр. 106, Москва, 2008.
 12. Зебрев Г.И., Горбунов М.С., Моделирование взаимного подавления эффектов ELDRS и туннельной релаксации в STI изоляции приборов КМОП технологии при низкоинтенсивном облучении. // Научная сессия МИФИ – 2009, аннотации докладов, стр. 68, Москва, 2009.
 13. Горбунов М.С., Зебрев Г.И., Осипенко П.Н., Василегин Б.В., Ильягуев В.Н., Сравнение различных вариантов топологии КНИ МОП транзисторов для проектирования радиационно-стойких ИС. // Сборник научных трудов конференции «Стойкость – 2009», стр. 39-40, Лыткарино, 2009.
 14. Горбунов М.С., Зебрев Г.И., Многомасштабное моделирование радиационно-индуцированной утечки в элементах КНИ КМОП технологии. // Математическое и компьютерное моделирование систем: теоретические и прикладные аспекты: Сб. науч. тр. НИИСИ РАН под ред. акад. РАН В.Б. Бетелина. – М., НИИСИ РАН, 2009. – стр. 41-49.
 15. Горбунов М.С., Зебрев Г.И., Применение Verilog-A при разработке современных субмикронных интегральных схем специализи-

- рованного назначения. // Научная сессия НИЯУ МИФИ – 2010, аннотации докладов, стр. 103, Москва, 2010.
16. Горбунов М.С., Шнайдер А.И., Петрова М.М., Ильягуев В.Н., Особенности построения SPICE-моделей резисторов и транзисторов в КНИ КМОП технологии. // Научная сессия НИЯУ МИФИ – 2010, аннотации докладов, стр. 104, Москва, 2010.
 17. Zebrev G.I., Gorbunov M.S., Shunkov V.E., Gagarin E.A., Khakhaev A.V., Pershenkov V.S., Osipenko P.N., Vasilegin B.V., Sogoyan A.V., Nikiforov A.Y., “Physical Modeling and Circuit Simulation of Hardness of SOI Transistors and Circuits for Space Applications”, RADECS-2006 proceedings.
 18. Zebrev G.I., Gorbunov M.S., Pershenkov V.S., “Radiation Induced Leakage Due to Stochastic Charge Trapping in Isolation Layers of Nanoscale MOSFETs”, Proceedings of SPIE, Vol.7025, 2008.(G.I. Zebrev, M.S. Gorbunov, V.S. Pershenkov, “Radiation Induced Leakage Due to Stochastic Charge Trapping in Isolation Layers of Nanoscale MOSFETs”, International Conference “Micro- and nanoelectronics – 2007” (ICMNE-2007), P1-27, 2007).
 19. Zebrev G.I., Gorbunov M.S., Osipenko P.N., “Multi-scale Modeling of Low Dose-Rate Total Dose Effects in Advanced Microelectronics”, MIEL 2008 Proceedings, vol. 2, pp. 591-594, Nis, Serbia, 2008.
 20. 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 Nuclear Science, vol. 56, no. 4, pp. 2230-2236, August 2009 (Presented at RADECS 2008 Workshop Proceedings, pp.459-464, Jyväskylä, Finland, 2008).
 21. Gorbunov M.S., Zebrev G.I., Osipenko P.N., “Radiation-Hardening-by-Design with Circuit-Level Modeling of Total Ionizing Dose Effects in Modern CMOS Technologies. ICMNE-2009 Proceedings”. (To be published in Proceedings of SPIE).