004612996

На правах рукописи

ВАСИЛЬЕВ АЛЕКСЕЙ ЛЕОНИДОВИЧ

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ МИКРОСХЕМ ФЛЭШ ПАМЯТИ

05.13.05 - Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

Автореферат диссертации

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Автор:

1 8 НОЯ 2010

Москва – 2010 г.

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)

Научный руководитель	Доктор технических наук, профессор Чумаков Александр Иннокентьевич
Официальные оппоненты:	Доктор технических наук Помазан Юрий Викторович
	Кандидат технических наук Вавилов Владимир Алексеевич
Ведущая организация:	ФГУ «22 ЦНИИИ Минобороны России»

Защита состоится 22 ноября 2010 г. в 14 час. 00 мин.
На заседании диссертационного совета Д212.130.02
в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»
по адресу: 115409 Москва, Каширское шоссе, 31, тел. 324-84-98, 323-91-76

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ

Автореферат разослан 20 октября 2010 г.

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

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор П.К. Скоробогатов

Общая характеристика работы

Диссертация направлена на решение важной научно-технической задачи по моделированию, оценке, прогнозированию и обеспечению радиационной стойкости микросхем флэш памяти и электронных устройств на их основе при воздействии ионизирующих излучений искусственного и естественного происхождений, имеющих существенное значение для построения высоконадежных электронных устройств систем управления военного, космического и другого специального назначения, улучшения их функциональных и эксплуатационных характеристик, а также эффективности их применения в специальных условиях.

Актуальность темы диссертации обусловлена необходимостью развития функционально-сложных систем управления и контроля в электронной аппаратуре космического и военного назначения, работающей длительное время в автономном режиме. Большинство технических и эксплуатационных характеристик этих систем обусловлены характеристиками входящих в их состав энергонезависимых запоминающих устройств на основе флэш памяти. Благодаря своим преимуществам, флэш память становится одним из основных элементов современных автономных систем управления, функционирующих в условиях воздействия радиационных факторов.

Повышение требований к тактико-техническим характеристикам современных специальных систем управления требует применения флэш памяти, с одной стороны, большой информационной емкости, а с другой стороны - с требуемыми характеристиками по радиационной стойкости. Повышение информационной емкости за счет уменьшения размеров ячеек памяти с переходом на субмикронные технологические нормы проектирования приводит к возрастанию роли паразитных структур, что проявляется в существенном усложнении характера радиационного поведения флэш памяти и уменьшении энергии, необходимой для возможного стирания информации в ячейках памяти, то есть потенциально повышается их чувствительность к радиационным воздействиям по сравнению с ИС малой степени интеграции.

В условиях недостаточного развития российской микроэлектронной промышленности и отсутствия отечественных микросхем энергонезависимой памяти большой информационной емкости сложилась практика частичного комплектования узлов систем управления флэш памятью иностранного производства, для которой требуется получение объективной информации по ее радиационной стойкости. Учитывая низкие объемы отечественного микроэлектронного производства, его неритмичность и прерывистость, применение

изделий иностранного производства, требует поиск новых решений в области разработки и внедрения новых высокоэффективных методов оценки, прогнозирования, обеспечения и контроля радиационной стойкости флэш памяти на всех этапах жизненного цикла изделий.

Сложность анализа поведения микросхем флэш памяти во время действия ионизирующего излучения обусловлена, достаточно большим количеством разных видов радиационных эффектов в них – с одной стороны, а также разнообразием типов флэш памяти, увеличивающимся по мере совершенствования технологического процесса – с другой стороны.

Перечисленными выше факторами обусловлена необходимость развития существующих, а также разработки новых методов и средств исследования радиационной стойкости флэш памяти. Важность и актуальность темы диссертации отражена в подпрограмме «Развитие электронной компонентной базы» на 2007-2011 годы в составе ФЦП «Национальная технологическая база», в соответствии с которой создание радиационно-стойкой электронной компонентной базы при ее разработке, производстве и применении в стратегически значимых системах отнесено к одной из приоритетных задач.

Состояние исследований по проблеме. Вопросам анализа, моделирования и разработки энергонезависимой памяти посвящены работы д.т.н. Шелепина Н.А (ОАО "НИИМЭ и Микрон"), к.т.н. Севрюкова А.Н. (ЗАО ЦП "Ангстрем-СБИС"). Вопросам моделирования, оценки и прогнозирования радиационной стойкости БИС запоминающих устройств посвящены многочисленные работы к.ф-м.н. Полякова И.В. (ОАО «НПП «Сапфир»), Калинина А.В., к.т.н. Машевича П.Р., Романова А.А. (ОАО «Ангстрем»), к.т.н. Барбашова В.М., к.т.н. Герасимова Ю.М., к.т.н. Григорьева Н.Г., к.т.н. Яненко А.В. (НИЯУ МИФИ) и других специалистов.

Отдельные вопросы по развитию методических и технических средств контроля параметров БИС ЗУ в процессе радиационного эксперимента на моделирующих установках (МУ) предложены к.т.н. Калашниковым О.А. (МИФИ), к.т.н. Фигуровым В.С. и Емельяновым В.В. (ФГУП «НИИП»). Методы моделирования и радиационных испытаний интегральных микросхем были развиты в работах д.т.н. Улимова, В.Н, д.т.н. Зинченко В.Ф. (ФГУП «НИИП»), д.т.н. Скоробогатова П.К. , д.т.н. Никифорова А.Ю., д.т.н. Чумакова А.И., к.т.н. Согояна А.В. (МИФИ), что обеспечило повышение объема испытаний, увеличения информативности функционального и параметрического контроля интегральных микросхем по сравнению с испытаниями на моделирующих установках.

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

- увеличивается взаимное влияние различных функциональных модулей флэш памяти на характер радиационного поведения вследствие очень плотной их упаковки;

- возрастает объем хранимой информации при переходе на многобитовые ячейки памяти;

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

- возрастает роль паразитных структур, параметры которых не контролируются в процессе производства, что проявляется в существенном усложнении характера радиационного поведения БИС флэш памяти (влиянии на стойкость режима функционирования, технологии, условий применения и т.п.);

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

- усиливается роль эффектов, обусловленных локальными радиационными эффектами вследствие воздействия отдельных ядерных частиц, что может приводить к отказам ИС.

Таким образом, к началу диссертационной работы методики и средства идентификации наиболее чувствительных элементов и узлов микросхем флэш памяти, определяющих уровни доминирующих радиационных отказов и сбоев в них с учетом проявления радиационных эффектов, были проработаны недостаточно, что является заметным препятствием на пути выработки рекомендаций по применению микросхем флэш памяти в электронной аппаратуре специального назначения. Имеющиеся на момент начала работы аппаратно-программные средства эксперимента не обеспечивали возможности полноценного автоматизированного управления (в том числе и дистанционного для применения на моделирующих и имитирующих установках), функционального контроля и диагностирования их элементов и функциональных узлов на стойкость ко всем доминирующим радиационным эффектам (объемной и поверхностной ионизации, эффектам от отдельных ядерных частиц).

Целью диссертации является развитие методов и технических средств моделирования и оценки показателей радиационной стойкости микросхем флэш памяти, элементов и функциональных узлов на их основе.

Указанная цель достигается решением в работе следующих задач:

- расчетно-экспериментальное моделирование доминирующих радиационных эффектов в элементах и узлах микросхем флэш памяти при воздействии различных видов ионизирующего излучения;

- поиск и анализ наиболее критичных функциональных узлов, отвечающих за радиационный отклик ИС в целом и влияние технологий изготовления микросхем флэш памяти на показатели радиационной стойкости;

- разработка и апробирование методик исследования влияния радиационных дефектов микросхем флэш памяти на их работоспособность;

- разработка методических, аппаратно-программных средств для проведения экспериментальных радиационных исследований и испытаний микросхем флэш памяти на моделирующих и имитирующих установках;

- получение и систематизация оригинальных экспериментальных данных, устанавливающих общность радиационного поведения ИС флэш памяти в широких диапазонах режимов работы и условий эксплуатации.

Научная новизна работы состоит в разработке:

- моделей, учитывающих схемно-технологическую реализацию микросхем флэш памяти и позволяющих проводить прогнозирование радиационного поведения к дозовым и локальным радиационным эффектам микросхем флэш памяти с проектными нормами до 0.1 мкм;

- методики расчетно-экспериментального моделировании сбоев и отказов в микросхемах флэш памяти вследствие дозовых и локальных радиационных эффектов, позволяющей учитывать режим функционирования в процессе радиационных исследований, достоверно оценивать уровень радиационной стойкости микросхем флэш памяти и выявлять наихудшие режимы функционирования;

- методики исследования микросхем флэш памяти при наличии радиационных макродефектов, позволяющей оценить влияние радиационно-индуцированных неоднородностей, создаваемых в чувствительной области элемента памяти, используя количество циклов перезаписи микросхемы флэш памяти;

- аппаратно-программных средств и методов функционального контроля, позво-

ляющих проводить дистанционные испытания (до 50 м) флэш памяти с объемом до 64 Гбайт с частотой опроса до 50 МГц на моделирующих и имитирующих установках в условиях действия мощных электромагнитных помех.

Практическая значимость работы:

1. Предложена структура и реализован универсальный аппаратно-программный комплекс, позволяющий производить функциональный контроль широкого класса современных ИС флэш памяти. Разработанный комплекс позволяет производить гибкую настройку для каждого исследуемого типономинала, производить функциональный и параметрический контроль непосредственно в процессе радиационных испытаний.

2. Разработаны методики функционального контроля ИС флэш памяти, учитывающие вид радиационного воздействия и внутреннюю архитектуру флэш памяти. Разработанные методики позволяют определить место возникновения сбоя или отказа, а также обеспечить наиболее критичный режим для разных факторов ионизирующего излучения.

3. Получены оригинальные результаты испытаний более чем 20 типономиналов флэш памяти. Выявлены основные особенности радиационного поведения рассматриваемого типа ИС, наиболее критичные узлы и режимы работы.

4. Результаты диссертации вошли в отчетные материалы по НИР и составным частям ОКР («Абонемент», «Автолог», «БИВК-СВВ», «Джут», «Микология», «Микро-Д», «Сверло С2» и др.), выполняемых в интересах Минобороны РФ, Росатома и предприятий оборонного комплекса.

5. Результаты использованы в проекте РД В 319.03.58-2010 «Методы испытаний и оценки стойкости интегральных схем и мощных МДП-транзисторов по эффектам отказов от воздействия отдельных высокоэнергетичных тяжелых заряженных частиц и протонов космического пространства» и в «Методические указания по обеспечению стойкости бортовой аппаратуры изделий разработки ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» к воздействию тяжелых заряженных частиц и высокоэнергетичных протонов космического пространства».

6. Методика функционального контроля ИС флэш памяти и аппаратно-программный комплекс функционального контроля внедрены в ОАО «ЭНПО СПЭЛС»

Результаты, выносимые на защиту:

1. Расчетно-экспериментальные методы моделирования доминирующих радиационных эффектов в элементах и узлах микросхем флэш памяти при воздействии различных видов ионизирующего излучения.

2. *Модели дозовых отказов и локальных радиационных эффектов микросхем флэш* памяти в различных режимах функционирования.

3. Методики экспериментальных исследований микросхем флэш памяти по определению радиационной стойкости при воздействии различных факторов естественного и искусственного происхождений и реализующие ее технические средства, обеспечивающие относительно полный функциональный контроль микросхем флэш памяти.

4. Расчетно-экспериментальный метод и методику исследования влияния радиационных макродефектов на работоспособность микросхем флэш памяти.

5. Результаты экспериментальных исследований радиационного поведения и испытаний основных типов микросхем флэш памяти отечественного и иностранного производства по всей совокупности доминирующих радиационных эффектов.

6. Аппаратно-программные средства для контроля функциональных и электрических параметров микросхем флэш памяти в процессе радиационных испытаний.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на российских научных конференциях "Радиационная стойкость электронных систем" (Лыткарино, 2005-2010 гг.); научных сессиях МИФИ (Москва, 2006-2009 гг.); на научных конференциях "Электроника, микро– и наноэлектроника" (2005-2009 гг.).

Публикации: Основные результаты диссертации опубликованы в 11 работах (в период с 2005 по 2010 гг.), в том числе 2 – в реферируемых журналах и 8 - без соавторов.

Объем и структура диссертации. Диссертация содержит 141 страницу, в том числе 48 рисунков, 6 таблиц, список литературы из 110 наименований и состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

Содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель, научная новизна, практическая значимость работы.

В первой главе проведен обзор научных работ, посвященных строению микросхем флэш памяти, основным принципам работы ячеек, особенностям режимов их функционирования, а также принципам построения внутренней архитектуры анализируемого вида ИС. Рассматриваются тенденции и перспективы развития ИС флэш памяти.

Вторая глава посвящена вопросам расчетно-экспериментального моделирования основных радиационных эффектов в элементах и узлах микросхем флэш памяти. Рассмотре-

ны основные доминирующие радиационные эффекты при воздействии ионизирующего излучения различной природы, выявлены наиболее чувствительные к ним узлы ИС флэш памяти. На основе экспериментальных результатов как опубликованных, так и полученных лично автором проанализированы механизмы сбоев и отказов в микросхемах флэш памяти. Результаты проведенного моделирования дозовых отказов периферийных схем и ячеек флэш памяти удовлетворительно соотносятся с экспериментальными результатами. Выявлены основные причины сбоев в ячейках флэш памяти под действием отдельных ядерных частиц (ОЯЧ), представлены результаты прогнозирования по чувствительности многоуровневых ячеек памяти к действию ОЯЧ. Приведены результаты экспериментального моделирования работоспособности микросхемы при действии импульсного гамма излучения.

Третья глава содержит информацию о радиационном поведении различных представителей семейства микросхем флэш памяти. На основе большого количества полученных экспериментальных данных обобщаются основные закономерности поведения микросхем флэш памяти под действием разных видов ионизирующего излучения.

В четвертой главе представлены методические аспекты при проведении экспериментальных исследований на чувствительность ИС флэш памяти к различным типам доминирующих радиационных эффектов. Обосновывается рациональный состав испытаний с учетом особенностей задания режимов и контроля параметров СБИС флэш памяти при экспериментальных исследованиях.

Пятая глава посвящена рассмотрению аппаратно-программных средств для экспериментальных исследований радиационной стойкости СБИС флэш памяти. Представлены различные технические и программные средства, разработанные при участии автора.

Анализ внутренней архитектуры, технологических особенностей и режимов работы микросхем флэш памяти. Постановка цели диссертации

Современные системы управления электронной аппаратуры военной и космической техники включают в себя энергонезависимую память, которая обеспечивает хранение прикладного программного обеспечения, констант и некоторой другой дополнительной информации, например, электронных карт звездного неба или местности. Если раньше эта информация хранилась на магнитных носителях, то в современных электронных системах предпочтение отдается энергонезависимой памяти, реализованной на интегральных схемах. К основным преимуществам такого способа хранения данных можно отнести компактность микросхемы, малую потребляемую мощность, быстродействие, большой объем хранимых данных и относительно небольшую стоимость. Все выше перечисленные дос-

тоинства микросхем флэш памяти делают ее незаменимым компонентом электронных систем военной и космической аппаратуры.

Развитие современных электронных систем управления военной и космической техники ставит задачу использования стойкой номенклатуры электронных компонентов и, в частности, микросхем флэш памяти. Однако, как показывает анализ, микросхемы флэш памяти в силу своего принципа работы могут иметь высокую чувствительность при воздействии ионизирующего излучения (ИИ) искусственного и естественного происхождений. Усложняет процесс анализа и систематизации радиационного поведения микросхем флэш памяти большое количество их типов, разнообразие схемотехнических и топологических решений, принадлежащих разным производителям. Перед автором встала задача по систематизации большого количества данных о радиационной стойкости микросхем флэш памяти, полученных как по итогам собственных экспериментальных исследований, так и по уже известным результатам, в ходе которой было необходимо выделить основные чувствительные узлы и режимы работы разных типов ИС.

Другой задачей, требующей отдельного решения при исследовании радиационной чувствительности ИС флэш памяти, стало отсутствие доступных технических средств для контроля работоспособности микросхем флэш памяти при проведении испытаний на радиационную стойкость. Проведенный анализ показал, что система контроля функционирования должна обладать мобильностью, иметь достаточную гибкость при ее настройке для каждого исследуемого типономинала. Решение последней задачи невозможно без разработки общих методических подходов при исследовании радиационных характеристик микросхем флэш памяти.

Анализ радиационных эффектов микросхем флэш памяти показал, что их характер зависит от внутреннего строения и определяется как типом архитектуры, так и структурой самих ячеек. Этот анализ должен базироваться на концепции доминирующих радиационных эффектов, так он позволяет выявить общие закономерности в радиационном поведении ИС флэш памяти.

Важным фактором, влияющим на радиационную стойкость ИС флэш памяти, является режим ее работы в процессе воздействия. Отличительной особенностью микросхем флэш памяти от предыдущих поколений является то, что операции с хранимой информацией осуществляются блоками. Это достигается за счет новых схемотехнических и технологических решений (разные схемы соединений между ячейками, различные уровни легирования стока и истока для обеспечения необходимых уровней напряжения пробоя, разли-

чия в степени перекрытия сток-затвор и исток-затвор для обеспечения перезаписи информации и др.).

В результате на рынке сформировались два доминирующих класса флэш памяти, отличающиеся по внутренней архитектуре: это флэш память NOR и NAND типа. Флэш память с внутренней архитектурой NOR, как правило, используют для хранения небольшого количества информации с возможностью доступа к отдельному байту, такой вид памяти рационально использовать для хранения программ процессора или данных небольшой таблицы. Флэш память NAND типа служит для хранения большого количества информации, имеет потенциально больший объем и меньшую стоимость одного бита информации по сравнению с NOR памятью. Однако скорость чтения произвольных ячеек памяти у NAND памяти значительно ниже, чем у ИС с архитектурой NOR. С целью повышения доступа к данным используют внутреннее буферное ОЗУ: считывание и запись в накопитель NAND происходит через эту регистровую структуру, что значительно ускоряет работу с кластером соседних байтов.

Основное различие между двумя архитектурами заключается в способе внутренних связей между ячейками. Достоинства и недостатки этих способов определяет строение и доступные внутренние операции. Ячейки памяти архитектура NAND имеют меньшее количество контактов с внешними линиями (сток одного транзистора напрямую соединен с истоком другого). Это обстоятельство позволяет существенно экономить место на кристалле, позволяя на той же площади создавать больший объем информации, однако, как было указано выше, это снижает скорость чтения данных и делает туннелирование единственно возможным механизмом для зарядки или разрядки плавающего затвора.

Как показывает анализ технологического развития, в ближайшее время стоит ожидать дальнейшего роста хранимого количества бит на кристалл. Данное обстоятельство обусловлено как дальнейшим уменьшением технологических норм ИС, так и внедрением многоуровневых ячеек памяти, т.е. ячеек, которые хранят несколько бит информации. Обе тенденции могут значительно повлиять на радиационную чувствительность микросхемы флэш памяти.

Расчетно-экспериментальная оценка чувствительности ИС флэш памяти к основным факторам ионизирующего излучения

Расчетно-экспериментальная оценка чувствительности ИС флэш памяти проводилась на основе концепции доминирующих радиационных эффектов, к которым относятся

поверхностные (дозовые) эффекты, локальные радиационные эффекты (эффекты от ОЯЧ) и эффекты объемной ионизации.

Дозовые эффекты

Анализ экспериментальных исследований на чувствительность микросхем к дозовому фактору позволяет выделить два вида отказа – параметрический (выход какого-либо параметра СБИС флэш памяти из допустимого диапазона) и функциональный (связанный с невозможностью хранить или перезаписать информацию). Типичные уровни стойкости по дозовым отказам, полученные авторам по результатам собственных испытаний, приведены на рис.1(а) и рис.1(б).

(а)

(б)

Рис.1. Типичные уровни стойкости (параметрический и функциональный) для разных типономиналов микросхем флэш памяти

Несмотря на внешнее сходство представленных зависимостей, параметрические и функциональные уровни стойкости не всегда коррелируют друг с другом и имеют широкий разброс. Следует отметить, что критичным является уровень стойкости по функционированию, так как даже при существенном выходе параметров за пределы допустимых свойство хранить и перезаписывать информацию у СБИС флэш памяти остается.

Проведенный анализ показал, что наиболее вероятный отказ в работоспособности флэш памяти при воздействии дозового фактора связан в первую очередь с нарушением работы периферийной цепи (высоковольтных схем), отвечающей за процессы записи и/или стирания информации. При этом необходимо оценить также стойкость не только слабого узла, но и самого накопителя данных для оценки потенциального запаса по радиационной стойкости последующего поколения ИС флэш памяти.

Эту оценку можно провести из величины заряда, хранимого на плавающем затворе. Как только генерируемый ИИ избыточный заряд будет сопоставим с величиной хранимого, следует ожидать потери информации в ячейке памяти. Основными причинами формирования заряда являются: эффект фотоэмиссии и генерация электронно-дырочных пар в диэлектрике (рекомбинация дырок с электронами, хранящимися на плавающем затворе и накопление положительного заряда в окисле). Оценка типового уровня суммарной дозы, необходимой для потери информации в ячейке памяти, опираясь на предложенную выше модель потери заряда, составляет величину более 10^5 ед.

Однако этот вид отказов не является определяющим. Проведенный анализ показал, что во флэш памяти наиболее уязвимым узлом является узел внутреннего генератора повышенного напряжения. Данное обстоятельство обусловлено двумя основными причинами: транзисторы этого узла имеют более толстый подзатворный окисел, а сам внутренний генератор повышенного напряжения строится по каскадному принципу. Оценки, произведенные автором, показывают, что типовой уровень стойкости по дозовым эффектам этого узла составляет около 10^4 ед.

Данный вывод получил подтверждение в ходе проведенных автором многочисленных экспериментальных исследований флэш памяти различных производителей. Действительно, внутренний генератор повышенного напряжения является самым чувствительным узлом и его уровень стойкости на порядок меньше, чем уровень стойкости массива ячеек памяти. Экспериментальные результаты показывают, что стойкость самого генератора для большинства ИС флэш памяти лежит в широком диапазоне и обычно составляет $(10 - 40)\cdot 10^3$ ед, в зависимости от технологии производства и фирмы производителя. Стойкость самого накопителя в этом случае, как правило, выше 10^5 ед.

Представленные выше оценки уровня стойкости характерны для микросхем флэш памяти, выполненных по технологии более 100 нм, в ячейках которых может храниться 1 бит информации. С уменьшением топологических норм и развитием технологии в периферийной цепи используется меньшее напряжение стирания/программирования, также значительно снижается толщина подзатворного окисла транзисторов, входящих в состав генератора повышенного напряжения. Это приводит к тому, что существенно снижается чувствительность характеристик этого генератора к дозовым эффектам. На рис.2 и рис.3 приведены уровни стойкости ячеек памяти и генератора повышенного напряжения для разных значений топологических норм производства.

Рис.2. Уровень стойкости генератора повышенного напряжения для разных топологических норм производства СБИС флэш памяти

Рис.3. Уровень стойкости ячеек флэш памяти для разных топологических норм СБИС флэш памяти. Указаны одноуровневые (SLC) и многоуровневые (MLC) ячейки памяти

Применение современной технологии многоуровневых ячеек памяти производства СБИС флэш памяти, по оценке автора, в несколько раз увеличивает чувствительность самих ячеек памяти к дозовым эффектам и уровень радиационной стойкости в этом случае

будет определяться чувствительностью массива ячеек памяти. Данные выводы подтверждаются результатами проведенных экспериментальных исследований.

Одиночные события при воздействии ОЯЧ

Исходя из общих моделей возникновения локальных радиационных эффектов (эффектов от воздействия ОЯЧ), они возникают в регистровых структурах (регистры адреса, регистры внутреннего автомата, буферное ОЗУ) и в самих ячейках памяти накопителя. Сбои в регистровых структурах могут привести как к изменениям считываемой или записываемой информации (сбои в регистре адреса, сбои в буферном ОЗУ), так и к временной потере работоспособности всей ИС при сбоях в регистре внутреннего автомата.

Автором в ходе экспериментальных исследований были обнаружены сбои во флэш памяти, вызванные изменением режима работы БИС. Экспериментальные исследования показали, что сбои во внутреннем автомате могут также стать причиной непреднамеренного включения цикла стирания информации во всем блоке или микросхемы. В этом случае происходит изменение информации во всем блоке памяти, а в цепи питания имеет место значительное увеличение тока потребления.

Особую важность среди локальных радиационных эффектов занимают события, связанные с действием ОЯЧ непосредственно на ячейку памяти. Как показали результаты исследований, потеря заряда с плавающего затвора при воздействии ОЯЧ происходит несколькими способами. Первый механизм связан с кратковременным разрядом плавающего затвора вдоль трека, прошедшего через подзатворный диэлектрик иона. Потеря заряда в этом случае зависит от линейных потерь энергии (ЛПЭ) иона. Оценка уровня стойкости может быть проведена с помощью моделирования стекания заряда за короткий промежуток времени вдоль трека заряженной частицы. Эквивалентная схема кратковременной разрядки плавающего затвора показана на рис.4. Величина резистора R может быть оценена через среднее сопротивление токопроводящего канала. Его значение меняется от десятков кОм при линейных потерях тяжелой заряженной частицы (ТЗЧ) ЛПЭ около единиц МэВ·см^2/мг до десятков Ом при ЛПЭ около 100 МэВ·см^2/мг и, в первом приближении, может быть оценена из следующего соотношения:

$$R(t) \approx \frac{\varepsilon_i \cdot \rho}{q \cdot \mu \cdot LET} \cdot \frac{d_{ox}}{4\pi \cdot \ln(t/t_o)},$$

где ε_i – энергия образования одной электронно-дырочной пары в диэлектрике; q – заряд электрона; t_o - время существования трека в окисле; μ - подвижность носителей заряда; ρ -

плотность диэлектрика; d_{ox} – толщина диэлектрика. Проведя усреднение по времени, можно получить оценку сопротивления утечки в следующем виде.

$$R \approx R_o \cdot \left(\frac{LET_o}{LET} \right)^2 .$$

с типовыми значениями коэффициентов R_o~200 и LET_o~20. Представленное приближенное соотношение не учитывает многие эффекты, которые приводят к снижению зависимости от ЛПЭ. Сравнение с известными экспериментальными результатами показывают, что наилучшее соответствие будет иметь место при использовании показателя степени 1.5 вместо 2.

Рис.4. Эквивалентная схема кратковременной разрядки плавающего затвора: C_{pp} – емкость управляющий затвор – плавающий затвор, C_{ox} – емкость плавающий затвор – подложка

Эта модель позволяет оценить потерю заряда для одноуровневых ячеек памяти при облучении ионами и протонами. Так, например, при воздействии протонами с энергиями выше 100 МэВ потеря заряда составит менее 10% от исходной величины для ИС, изготовленных по проектным нормам выше 0.18 мкм. Действительно, в ходе экспериментальных исследований, проведенных автором на ускорителях протонов на базах ПИЯФ и ИТЭФ, потерь информации обнаружить не удалось, что является подтверждением сделанных допущений. Но в случае применения многоуровневых ячеек памяти, выполненных по технологии с плавающим затвором, во флэш памяти возможна потеря информации даже при облучении протонами или нейтронами. Такие сбои были обнаружены экспериментально при облучении ТЗЧ с небольшим значением ЛПЭ протонами, и даже нейтронами с энергией около 5 МэВ для ИС флэш памяти с топологическими нормами менее 100 нм.

Другой механизм потери заряда проявляется спустя некоторое время, и связан, как полагают, с медленным постепенным стеканием заряда с плавающего затвора через поврежденный прошедшим ионом туннельный диэлектрик.

Теоретический анализ чувствительности микросхем флэш памяти к ТЗЧ показывает, что с уменьшением топологических норм уровень стойкости сохранности информации в ячейках флэш памяти будет снижаться, а также возрастает вероятность одиночные эффекты в периферийных цепях. Типовые пороговые значения ЛПЭ для сбоев в самих ячейках памяти для разных топологических норм показаны на рис.5. Здесь же представлены расчетные данные, полученные на основе представленной выше модели.

Рис.5. Уровни пороговых значений ЛПЭ для сбоев в ячейках накопителя при разных топологических нормах производства СБИС флэш памяти

Объемные ионизационные эффекты.

Нарушение функционирования флэш памяти возможно и при импульсном воздействии гамма излучения. Выявленные сбои связанны с потерей информации в регистровых структурах, изменениями выходных логических уровней, а также условиями работы ИС (режимы записи и стирания очень чувствительны к незначительным просадкам на шине питания). Экспериментальные исследования, проведенные автором, показали, что минимальный уровень радиационной стойкости ИС флэш памяти соответствует циклу стирания. Изменение информации в накопителе обнаружено не было. Однако были обнаружены

сбои в буферном ОЗУ, которые могут внести искажение в информацию при циклах чтения или записи во флэш памяти с внутренней архитектурой NAND.

Влияние ионизирующего излучения на характеристики типовых представителей СБИС флэш-памяти

Результаты проведенного моделирования сбоев и отказов в элементах флэш памяти позволяют определить наиболее чувствительные узлы и их режимы работы. Было показано, что в современных однобитных ИС наиболее чувствительным элементом к дозовому фактору является внутренний генератор повышенного напряжения. Однако нарушения в работоспособности при дозовых эффектах, могут происходить и в других элементах периферийной цепи и быть не связанными с циклами перезаписи. Как правило, распознать такие сбои в работе позволяет анализ распределения ошибок по байтам: для ошибок в накопителе свойственно случайное их распределение, тогда как определенные закономерности в адресах ошибок говорят о нарушениях работы в периферийных узлах (селекторе адреса, усилителе записи считывания и др.). Анализ экспериментальных данных выявил, что чувствительность к дозовым эффектам зависит от режима функционирования и технологии производства. Основные дозовые эффекты в ИС флэш памяти с указанием для них типовых уровней стойкости приведены на рис.6.

Анализ экспериментальных результатов по сбоям и отказам СБИС флэш памяти при воздействии ОЯЧ позволяет выделить наиболее чувствительные узлы: буферное ОЗУ, регистровые структуры управляющего автомата и накопитель. Исследования показали что сбои во внутреннем ОЗУ весьма вероятны даже при низких значениях ЛПЭ ТЗЧ, пороговое значение данных эффектов лежит на уровне единиц МэВ·см^2/мг. Однако вероятность таких событий относительно невысока, так как размер внутреннего ОЗУ составляет несколько сотен байт.

Наиболее критичным эффектом, как показано автором, являются сбои, приводящие к нарушению работы внутреннего автомата, имеющего место в динамических циклах работы при проведении экспериментальных исследований. Характерное проявление сбоев во внутреннем автомате заключается в прекращении циклов записи или стирания, "зависания" СБИС флэш памяти. Данные виды сбоев не являются катастрофическими и могут быть исправлены либо повторением операции, либо, в крайнем случае, сбросом питания. Основные локальные радиационные эффекты в микросхемах флэш памяти приведены на рис.7.

Сбои во внутреннем автомате могут, как показали экспериментальные исследования, приводить к непреднамеренному включению цикла стирания. Эффект сопровождается кратковременным повышением тока потребления. Данный эффект был обнаружен экспериментально на образцах флэш памяти фирмы White Electronics design при воздействии ТЗЧ с ЛПЭ равным 40 МэВ·см^2/мг.

Рис.6. Основные дозовые эффекты в ИС флэш памяти

Рис.7. Основные локальные радиационные эффекты в СБИС флэш памяти

Потерю информации в ячейках флэш памяти удалось наблюдать экспериментально для ИС с многоуровневыми ячейками. Наблюдались переходы из состояний, имеющих больший электрический потенциал, в состояния с меньшим значением этого потенциала. У этого явления относительно низкий порог по величине ЛПЭ.

Как показал анализ произведенных исследований такие эффекты, как пробой туннельного диэлектрика при операциях перезаписи во время действия ОЯЧ при воздействии ионов с низким значением ЛПЭ, маловероятны. Также маловероятно событие тиристорного эффекта (видимо из-за малого количества паразитных тиристорных структур в накопителе), так как эти структуры формируются только в управляющих цепях.

Несомненный практический интерес представляют исследования по возможности влияния отдельных радиационных макродефектов на работоспособность микросхем флэш памяти. Действительно, при создании больших областей повреждения, вызванных каскадами смещений первично-выбитыми атомами в подзатворной области МОП транзисторов, можно ожидать увеличения токов утечек и, следовательно, уменьшения количества циклов записи/стирания.

Макродефекты или области разупорядочивания во флэш памяти создавались путем облучения 14 МэВ нейтронами и 1 ГэВ протонами общее количество которых N_r в микрообъеме величиной V_a при флюенсе частиц равном Φ можно оценить из соотношения:

$$N_r = \Phi \Sigma_r . V_a,$$

где Σ-макроскопическое сечение взаимодействия нейтрона (протона) для создания макродефекта. Например, для создания порядка 100 макродефектов во флэш памяти емкостью 16 Мбит необходимо облучать ИС флюенсами 14 МэВ нейтронов порядка $10^{10}...10^{11}$ нейтрон/см^2.

Автором были проведены экспериментальные исследования с целью проверки данного предположения. Несколько типов ИС флэш-памяти облучались 14 МэВ нейтронами и 1 ГэВ протонами. Последующие исследования не выявили в них уменьшение циклов «стирание/запись». Автором в исследуемых схемах флэш-памяти влияние радиационных макродефектов на основные показатели функционирования установлено не было.

Как показали результаты экспериментальных исследований влияния объемных ионизационных эффектов на работоспособность ИС флэш памяти, наиболее критичным для нее режимом является динамический режим работы. Чувствительные узлы и режимы представлены на рис.8.

Рис.8. Основные объемные ионизационные эффекты в СБИС флэш памяти

Методические обеспечение экспериментальных исследований радиационной стойкости СБИС флэш памяти

На основании анализа результатов, полученных автором в ходе радиационных исследований различных типов СБИС флэш памяти, следует заключить, что их уровень стойкости в значительной степени определяется внутренней архитектурой, особенностью реализации ячеек памяти и режимом работы микросхем. При испытаниях на чувствительность к дозовым эффектам необходимо уделить особое внимание контролю возможности перезаписи информации и сохранности ее после воздействия. С целью проверки работоспособности селектора адреса, целесообразно использовать нерегулярный код, каждый байт которого не коррелирует с адресом его расположения в массиве. В динамическом режиме (при операциях записи или стирания) необходимо следить за отсутствием просадок питания, так как за счет этого могут также происходить сбои в работе флэш памяти. Для многоуровневых ячеек памяти следует уделить особое внимание сохранности информации, так как именно этот параметр может определять радиационную чувствительность всей ИС.

В ходе исследований на стойкость к ОЯЧ необходимо обеспечить проверку регистровых структур СБИС флэш памяти, как в статическом, так и в динамическом режимах. Особое внимание следует уделить контролю сбоев, имеющих место в функционировании при динамическом режиме. Здесь характерные эффекты могут быть связаны с прекращением операций записи или стирания, а также их неправильным выполнением. Как при статическом, так и при динамическом режиме целесообразно контролировать ток потребления, выставляя границу тиристорного эффекта в несколько раз больше, чем максимально возможный ток потребления микросхемы (как правило, это максимальное значение тока наблюдается в режиме стирания). Регистрация этого тока может помочь обнаружить сбои в управляющей цепи, приводящие к непреднамеренному включению циклов стирания.

Обязательно нужно также осуществлять контроль информации во всем массиве поля ячеек флэш памяти. Для схем, имеющих внутренний промежуточный буфер, необходимо применять специальные алгоритмы для контроля в нем сбоев.

Чувствительность микросхем флэш памяти к эффектам мощности дозы необходимо определять в динамическом режиме (режим записи, стирания и чтения). При экспериментальном исследовании микросхем памяти с NAND архитектурой проводить воздействие целесообразно в псевдодинамическом режиме: сначала выполнить операцию чтения страницы в буфер, потом произвести воздействия, а затем считать буферное ОЗУ.

На рис.9 представлен разработанный автором алгоритм оценки наиболее чувствительных узлов и режимов работы СБИС флэш памяти при воздействии различных радиационных факторов.

Рис.9. Чувствительность различных узлов микросхемы флэш памяти к разным радиационным факторам

Аппаратно-программные средства для экспериментальных исследований радиационной стойкости СБИС флэш памяти

По результатам проведенных исследований для апробации предложенных методик автором был разработан программно-аппаратный комплекс на основе персонального компьютера (ПК) с дополнительными платами ввода/вывода. Это конфигурация обладает гибкостью, мобильностью и не очень высокой стоимостью. В состав комплекса входит цифровая плата ввода/вывода с шестью портами, а также аналоговая плата ввода/вывода, которая обеспечивает необходимую токовую нагрузку при измерении выходных логических уровней и контроле тока потребления. На рис.10 и рис.11 представлены схемы аппаратной и программной реализации разработанного комплекса. Такая реализация обеспечивает гибкость, универсальность и простоту работы с различными образцами микросхем флэш памяти.

Рис.10. Схема реализации аппаратной части разработанного комплекса

Специализированный программно-аппаратный комплекс, разработанный автором, позволяет обеспечить следующие параметры:

- Максимальная разрядность шины адреса: 24;
- Максимальная разрядность шины данных: 16;
- Максимальное количество сигналов управления: 8;
- Возможность работы как архитектурой NAND так и архитектурой NOR;
- Возможность пополнять библиотеку типономиналов;
- Возможность контроля функционирования и параметров ИС: ток потребления, время стирания и т.д.

Рис.11. Схема реализации программной части разработанного комплекса

С целью ускорения процедуры тестирования всего массива ячеек памяти при проведении экспериментальных исследований СБИС флэш памяти на воздействие ОЯЧ на осно-

ве ПЛИС был разработан специализированный аппаратно-программный комплекс, который позволяет проводить обмен информации с исследуемым образцом на максимально возможной скорости. Это устройство позволяет увеличить относительное время нахождения микросхемы флэш памяти в таких критичных для нее режимах, как запись и стирание при радиационных исследованиях.

Заключение

Основной результат диссертации заключается в развитии методов и технических средств моделирования и оценки показателей радиационной стойкости микросхем флэш памяти, элементов и функциональных узлов на их основе по всей совокупности доминирующих радиационных эффектов, который позволил повысить не менее чем в 2 раза достоверность оценки их показателей радиационной стойкости.

Основные научные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Проведено расчетно-экспериментальное моделирование доминирующих радиационных эффектов в элементах и узлах микросхем флэш памяти, на основании которых предложены и развиты модели дозовых отказов и локальных радиационных эффектов. Показано, что радиационная стойкость современных микросхем флэш памяти по дозовым эффектам определятся периферийными цепями и, в первую очередь, узлом формирования высокого напряжения, а для многоуровневых ячеек флэш памяти наиболее чувствительным узлом к дозовым эффектам будет сам накопитель. Предложены методы моделирования сбоев от воздействия ОЯЧ с учетом организации и технологии изготовления ИС флэш памяти.

2. Выявлены и проанализированы наиболее критичные функциональные узлы, отвечающие за радиационный отклик ИС флэш памяти. Показано, что наиболее критичными функциональными узлами, отвечающими за радиационный отклик ИС при дозовом воздействии, являются генератор формирования высокого напряжения или, собственно, ячейки памяти, реализованные в многобитовом исполнении. Предложена модель для определения сбоев и отказов в массиве ячеек памяти при наличии локальных радиационных эффектов, позволяющая проводить прогнозирование радиационного поведения микросхем флэш памяти с проектными нормами до 0.1 мкм. Показано, что массив многобитных ячеек более чувствителен к локальным радиационным эффектам, чем ячейки одноуровневой памяти.

Основные практические результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Разработаны и апробированы методики функционального тестирования микросхем флэш памяти с учетом особенностей их внутренней архитектуры и доминирующих радиационных эффектов, которые позволяют в процессе экспериментальных исследований обнаружить места возникновения сбоев или отказов, а также позволяют обеспечить наиболее критичные функциональные и электрические режимы работы ИС флэш памяти при проведении радиационных испытаний.

2. Разработаны методические и аппаратно-программные средства для проведения экспериментальных исследований и испытаний микросхем флэш памяти, которые позволяют обеспечить контроль электрических параметров и функционирования большинства основных видов ИС флэш памяти непосредственно в процессе экспериментальных исследований на моделирующих и имитирующих установках. Созданные аппаратно-программные средства и методы функционального контроля позволяют проводить дистанционные испытания (до 50 м) флэш памяти с объемом до 64 Гбайт с частотой опроса до 50 МГц на моделирующих и имитирующих установках в условиях действия электромагнитных помех.

3. Получены и систематизированы оригинальные экспериментальные данные, устанавливающие общность радиационного поведения ИС флэш памяти в широких диапазонах режимов работы и условий эксплуатации. Впервые получены данные о влияние радиационных макродефектов на работоспособность микросхем флэш памяти.

Таким образом, в ходе работы над диссертацией достигнута ее основная цель, а именно – развиты методы и технические средства моделирования и оценки показателей радиационной стойкости микросхем флэш памяти, элементов и функциональных узлов на их основ, что позволяет обеспечивать комплектование устройств вычислительной техники и систем управления объектов военного и космического назначения с заданными требованиями по радиационной стойкости.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

1. Методика оценки параметров чувствительности ИС к тиристорному эффекту при воздействии отдельных ядерных частиц / Чумаков А.И., Печенкин А.А., Егоров А.Н., Маврицкий О.Б., Баранов С.В., Васильев А.Л., Яненко А.В. // Микроэлектроника. – 2008. – Т. 37. – № 1. – С. 45-51.

2. Прогнозирование локальных радиационных эффектов в ИС при воздействии факторов космического пространства / Чумаков А.И., Васильев А.Л., Козлов А.А., Кольцов Д. О., Криницкий А.В., Печенкин А.А., Тарараксин А.С., Яненко А.В. // Микроэлектроника. –

2010, – Т. 39. – №2. – С. 85-90.

3. Васильев А.Л. Устройство контроля микросхем флэш памяти // Электроника, микро- и наноэлектроника. Сб. научн. трудов. – М.:МИФИ, 2005. – С. 214-215.

4. Васильев А.Л. Влияние макроскопических дефектов на надежность микросхем флэш памяти // Электроника, микро- и наноэлектроника. Сб. научн. трудов. – М.:МИФИ, 2005. – С. 206-208.

5. Васильев А.Л. Оценка чувствительности ячеек флэш памяти к дозовым эффектам // Электроника, микро- и наноэлектроника. Сб. научн. трудов. – М.:МИФИ, 2007. – С. 255-257.

6. Васильев А.Л. Прогнозирование чувствительности микросхем флэш памяти к дозовым эффектам // Электроника, микро- и наноэлектроника. Сб. научн. трудов. – М.:МИФИ, 2009. – С. 258-265.

7. Васильев А.Л. Расчетно-экспериментальное моделирование радиационных эффектов в микросхемах флэш памяти. // Научно-технический сборник «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость 2008». – М.:МИФИ, 2008. – С. 47-48.

8. Васильев А.Л. Чувствительность микросхем флэш памяти с разным напряжением питания к дозовым эффектам. // Научно-технический сборник «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость 2009». –М.:МИФИ, 2009. – С. 27-28.

9. Васильев А.Л., Сравнение чувствительности микросхем флэш памяти разных архитектур на чувствительность к одиночным событиям от высокоэнергетичных протонов и нейтронов // Научно-технический сборник «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость 2007». – М.: МИФИ, 2007. – С. 55-56.

10. Васильев А.Л., Согоян А.В., Чумаков А.И. Влияние радиационно-индуцированных макроскопических дефектов на надежность микросхем флэш памяти // Научно-технический сборник «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость 2006». – М.:МИФИ, 2006. – С. 264-265.

11. Локальные радиационные эффекты в ИС при нейтронном воздействии / Чумаков А.И., Баранов С.В., Васильев А.Л., Гришанцева Л.А., Яненко А.В. // VIII Межотраслевая конференция по радиационной стойкости. Сборник докладов. (г. Саров, 16-19 октября 2007 г.) – Саров: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ. – С .44-47.

Подписано в печать: 18.10.2010

Заказ № 4311 Тираж - 100 экз.

Печать трафаретная.

Типография «11-й ФОРМАТ»

ИНН 7726330900

115230, Москва, Варшавское ш., 36

(499) 788-78-56

www.autoreferat.ru