

ПЕТРОВ АНДРЕЙ ГРИГОРЬЕВИЧ

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОТКАЗЫ В МИКРОСХЕМАХ ФЛЭШ-ПАМЯТИ
ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ
КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА**

05.13.05 - Элементы и устройства вычислительной техники
и систем управления

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:



Москва – 2014 г.

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ».

Научный руководитель кандидат технических наук, доцент
Яненко Андрей Викторович

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Егоров Константин Владиленович
кандидат технических наук
Стещенко Владимир Борисович

Ведущая организация: ОАО «НИИМЭ и Микрон»

Защита состоится 13 апреля 2015 г. в час. мин.

На заседании диссертационного совета Д212.130.02

в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ

Автореферат разослан марта 2015 г.

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

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор



П.К.Скоробогатов

Общая характеристика работы

Диссертация направлена на решение актуальной научно-технической задачи развития методик и аппаратно-программного комплекса для экспериментальных исследований функциональных отказов микросхем флэш-памяти вследствие дозовых и одиночных эффектов от воздействия ионизирующих излучений космического пространства (ИИ КП).

Актуальность темы диссертации

В настоящее время микросхемы флэш-памяти широко используются в системах управления, вычислительных комплексах и целевой аппаратуре военного и космического назначения для хранения кодов программ и получаемых в ходе работы данных. Преимуществами флэш-памяти являются энергонезависимость, возможности перепрограммирования в составе системы и большой объем хранимой информации (гигабайты – терабайты) при приемлемой стоимости.

На сегодняшний день проектные нормы современных микросхем флэш-памяти уменьшились до 15 нм при максимальном достигнутом объеме 128 Гбит на одном кристалле. С уменьшением проектных норм в технологию производства вносятся различные изменения (применение high-k диэлектриков, отделяющих элемент хранения ячейки; применение слоя нитрида кремния или нанокристаллов в качестве элемента хранения; изменяется геометрия ячейки и др.). Также развивается технология 3D-флэш-памяти с вертикальным расположением ячеек памяти.

Помимо ячеек памяти (накопитель) в состав микросхем флэш-памяти входят различные управляющие узлы (генератор повышенного напряжения, буферная память, контроллер состояний, выходные цепи и др.). От воздействия ионизирующих излучений космического пространства в накопителе и в управляющих узлах микросхемы могут проявляться различные функциональные отказы – состояния, в которых микросхема неспособна выполнять свои прямые функции. Функциональные отказы могут проявляться в виде потери информации в ячейке накопителя флэш-памяти, невозможности ее перезаписи, наличия ошибок при считывании и т.д. В отличие от оперативных запоминающих устройств, потеря информации или ошибки считывания рассматриваются как отказы, так как флэш-память рассматривается, как правило, как постоянное энергонезависимое запоминающее устройство.

Уменьшение проектных норм приводит к существенному повышению чувствительности ячеек памяти и управляющих узлов к дозовым и одиночным эффектам при воздействиях ИИ КП. С развитием технологии, увеличением информационной емкости микро-

схем произошло изменение характера радиационного поведения и доминирующих механизмов радиационных отказов в микросхемах флэш-памяти.

Для микросхем с топологическими нормами более 200 нм основным механизмом дозовых отказов, как правило, являлся отказ встроенного генератора повышенного напряжения. При этом нарушение сохранности записанной информации наблюдалось при уровнях воздействия более 100 крад(Si). Одиночные сбои в ячейках памяти при воздействии тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) экспериментально не наблюдались при значениях ЛПЭ менее $30 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$. В современных микросхемах флэш-памяти потеря информации в ячейках накопителя при дозовом воздействии может происходить при уровне воздействия ниже 10 крад(Si), а информационные сбои наблюдаются даже при воздействии высокоэнергетичных протонов и ионов со значением ЛПЭ менее $5 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$ в том числе в пассивном режиме (при отключенном напряжении питания). Следовательно, такой распространенный подход, как «холодное резервирование» становится не применимым для повышения стойкости РЭА с применением микросхем флэш-памяти по эффектам потери информации.

Существующие на момент начала работы над диссертацией методики экспериментальных исследований функциональных отказов не учитывали описанные выше особенности радиационного поведения современных микросхем флэш-памяти, и не позволяли оценивать их стойкость к ИИ КП по каждому из возможных видов функциональных отказов.

Таким образом, актуальной является задача совершенствования методик экспериментальных исследований функциональных отказов микросхем флэш-памяти от воздействия ИИ КП вследствие дозовых и одиночных эффектов, в том числе направленных на оценку стойкости и параметров чувствительности по каждому виду функционального отказа с учетом режима работы микросхем флэш-памяти в аппаратуре космических аппаратов (КА).

Состояние исследований по проблеме

Методы экспериментальных исследований функционально-сложных сверхбольших интегральных микросхем были развиты в работах д.т.н. Скоробогатова П.К., д.т.н. Никифорова А.Ю., д.т.н. Чумакова А.И (все из НИЯУ МИФИ). В наибольшей степени вопросы расчетно-экспериментального моделирования, прогнозирования и разработки методик радиационных испытаний микросхем памяти развиты в трудах к.т.н. Улановой А.В., к.т.н. Яненко А.В. Отдельные вопросы развития методических и технических средств контроля параметров микросхем памяти в процессе радиационного экс-

перимента рассмотрены в работах к.т.н. Калашникова О.А. (НИЯУ МИФИ), к.т.н. Фигурова В.С. (ФГУП «НИИП») и др.

Вопросам анализа, моделирования и разработки элементов энергонезависимой памяти посвящены работы д.т.н. Шелепина Н.А (ОАО «НИИМЭ и Микрон»), к.т.н. Согояна А.В., к.т.н. Севрюкова А.Н. (НИЯУ МИФИ).

Исследованию радиационного поведения микросхем флэш-памяти за рубежом и в России посвящено большое количество работ. В работах зарубежных авторов N. Z. Butt, M. A. Alam, G. Cellere, S. Gerardin, M. Bagatin, A. Paccagnella, K. Grürmann, F. Gliem, T. R. Oldham, F. Irom, D. N. Nguyen, и российских авторов В.В. Емельянова и А.И. Озерова (ФГУП НИИП) описаны различные виды наблюдаемых радиационных сбоев и отказов в микросхемах флэш-памяти от воздействия ИИ КП. Методические и технические средства испытаний микросхем флэш-памяти на стойкость к воздействию ИИ КП представлены в диссертации и публикациях к.т.н. А.Л. Васильева (АО «ЭНПО СПЭЛС»).

В тоже время существующие на момент начала работы над диссертацией методики экспериментальных исследований функциональных отказов флэш-памяти от воздействия ИИ КП не учитывали модели радиационного поведения и существенное снижение стойкости ячеек современных микросхем флэш-памяти как при дозовом воздействии так и при воздействии отдельных ядерных частиц (ОЯЧ), в том числе в различных режимах работы флэш-памяти.

Существующие на момент начала работы аппаратно-программные средства для проведения радиационных исследований не обеспечивали возможность проведения полноценного автоматизированного контроля микросхем флэш-памяти предельной информационной емкости (максимальный достигнутый на данный момент объем флэш-памяти в одном модуле составляет до 1 Тб).

Таким образом, возникла необходимость развития существующих методик и аппаратно-программных средств для исследования функциональных отказов флэш-памяти вследствие дозовых и одиночных эффектов от воздействия ИИ КП с учетом особенностей работы ячеек флэш-памяти, физических механизмов, приводящих к потере заряда в ячейках флэш-памяти при воздействии ТЗЧ. и различных режимов работы флэш-памяти в аппаратуре КА.

Целью диссертации является развитие методик и аппаратно-программного комплекса для исследования функциональных отказов вследствие дозовых и одиночных эффектов

в микросхемах флэш-памяти от воздействия ИИ КП с учетом возможных режимов работы в составе аппаратуры космических аппаратов.

Указанная цель достигается решением в работе следующих **задач**:

- Систематизация и анализ экспериментальных данных по радиационной стойкости современных микросхем флэш-памяти иностранного и отечественного производства с целью уточнения доминирующих механизмов функциональных отказов.
- Разработка инженерной модели потери заряда в ячейках флэш-памяти при воздействии ТЗЧ, позволяющей определять пороговые ЛПЭ ТЗЧ по эффекту потери информации в ячейке флэш-памяти расчетными методами.
- Развитие методик экспериментального исследования функциональных отказов флэш-памяти от воздействия ИИ КП, с учетом влияния на результат условий проведения исследования: напряжения питания (в том числе пассивный режим), тестового информационного кода, последовательности режимов работы.
- Разработка методики, позволяющей экспериментально определять вид возникшего при воздействии ОЯЧ функционального отказа флэш-памяти для дальнейшего определения параметров чувствительности по каждому виду функционального отказа.
- Разработка базовых алгоритмов исследований стойкости флэш-памяти к воздействию ИИ КП по функциональным отказам с учетом возможных режимов работы в составе аппаратуры КА.
- Разработка аппаратно-программных средств для проведения радиационных исследований микросхем и модулей флэш-памяти с информационной емкостью не менее 1 Тб.
- Проведение исследований радиационной стойкости широкой номенклатуры микросхем флэш-памяти к воздействию ИИ КП, апробация разработанных методик.

Научная новизна работы:

1. Предложена оригинальная инженерная модель потери заряда в ячейке флэш-памяти при воздействии ТЗЧ, основанная на расчете разницы втекающих и вытекающих потоков носителей через границы плавающего затвора и окружающих его диэлектриков при пролете частицы. Модель позволяет проводить расчетную оценку пороговых ЛПЭ ТЗЧ эффекта потери информации в ячейке флэш-памяти при известных параметрах ячейки.

2. Предложено и обосновано развитие методик экспериментальных исследований функциональных отказов флэш-памяти при дозовом воздействии и воздействии ОЯЧ, учитывающее особенности работы ячеек флэш-памяти при различных электрических режимах и хранимой информации.

3. Предложены оригинальные базовые алгоритмы проведения исследований стойкости флэш-памяти к воздействию ИИ КП по функциональным отказам, позволяющие путем обоснованного специального чередования режимов работы во время испытаний получать данные о дозовой стойкости с учетом режима работы флэш-памяти в аппаратуре КА, а также экспериментальные данные по различным видам функциональных отказов при воздействии ОЯЧ для дальнейшего определения параметров чувствительности по каждому виду функционального отказа.

Практическая значимость работы:

1. Предложена и апробирована методика определения вида возникшего вследствие воздействия ОЯЧ функционального отказа, основанная на анализе результатов выполнения специальной тестовой последовательности, и позволяющая экспериментально определять параметры чувствительности флэш памяти по каждому виду функционального отказа.

2. Показаны преимущества использования лазерных методов для экспериментальных исследований функциональных отказов в управляющих цепях флэш-памяти от воздействия ОЯЧ, позволяющие определять чувствительные области на кристалле, в которых возникает одиночных эффект, уточнять параметры чувствительности по одиночным эффектам, используя процедуру совместной обработки экспериментальных данных, полученных на ускорителе ионов и лазерных установках.

3. Разработан аппаратно-программный комплекс, позволяющий проводить тестирование микросхем флэш-памяти объемом до 1 Тб с частотой обмена данными 10 Мбит/с.

4. Разработанные методические и технические средства проведения автоматизированных радиационных испытаний внедрены в АО «ЭНПО СПЭЛС» и ИЭПЭ НИЯУ МИФИ при оценке стойкости микросхем флэш-памяти, комплектующих аппаратуру изделий 14Ф137 №3, 14Ф147 №2, 14Ф148, 47КС №3, 14Ф31 №13, Луч-5Б, Луч-5В №11 и др.

5. Проведены исследования радиационной стойкости более 60 типов микросхем флэш-памяти иностранного и отечественного производства, результаты которых использованы при обеспечении сбоеустойчивости космической аппаратуры.

6. Предложена и апробирована при проведении исследований методика повышения стойкости флэш-памяти в аппаратуре КА при дозовом воздействии, позволяющая повысить дозовую стойкость по эффектам потери информации в ячейках флэш-памяти до уровня дозовой стойкости управляющих схем.

7. Результаты диссертации вошли в отчетные материалы по многочисленным НИОКР («Остров», «Кружево», «Память-2», «Такт-4М», «СРВ906-ТЗЧ» «Спектр-РГ-СВВ», «14К035-ТЗЧ», «Перспектива-3» и др.), выполненных по заказам Минобороны РФ,

Минпромторга, Роскосмоса и предприятий промышленного, оборонного и космического комплексов.

Результаты, выносимые на защиту:

1. Инженерная модель потери заряда в ячейках флэш-памяти при воздействии ТЗЧ, позволяющая при известных параметрах ячейки получить значения пороговых ЛПЭ ТЗЧ по эффекту потери информации в ячейке флэш-памяти.

2. Усовершенствованные методики экспериментальных исследований функциональных отказов флэш-памяти от воздействия ИИ КП по дозовым и одиночным эффектам, учитывающие влияние условий проведения исследований: напряжения питания (в том числе пассивный режим), тестовый информационный код, последовательность режимов работы на функционирование ячейки памяти при воздействии ионизирующего излучения.

3. Базовые алгоритмы исследований стойкости флэш-памяти к дозовому воздействию и воздействию ОЯЧ, учитывающие доминирующие механизмы функциональных отказов флэш-памяти с проектными нормами от 200 до 34 нм, и позволяющие определить стойкость флэш-памяти к дозовому воздействию, а также параметры чувствительности к воздействию ОЯЧ по каждому виду проявляющихся одиночных функциональных отказов, с учетом режима работы флэш-памяти в аппаратуре КА.

4. Экспериментальный комплекс для моделирования радиационных отказов и сбоев, позволяющий проводить дистанционные испытания микросхем и модулей флэш-памяти с объемом 1 Тб (и более за счет возможности добавления дополнительных аппаратных модулей) с частотой обмена данными до 10 Мбит/с, адаптированный для применения на 11 различных испытательных установках: («Гамма-Панорама»; У-31/33; РЭЛУС; РИК-0401; ГУ-200; АРСА; Синхроциклотрон (ПИЯФ, Гатчина); У-400; У-400М; ПИКО-3, 4; ФЕМТО-1).

5. Оригинальные результаты экспериментальных исследований функциональных отказов от воздействия ИИ КП для более 60 типов флэш-памяти, показывающие эффективность развитых методик исследования функциональных отказов и предложенных базовых алгоритмов исследований стойкости флэш-памяти к воздействию ИИ КП по функциональным отказам.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на международной конференции по радиационным эффектам в компонентах и системах (The Conference on Radiation Effects on Components and Systems – RADECS) (Биарриц, 2012 г.), 2-ой международной конференции «Second International Conference on Radiation and Dosimetry in Various Fields of Research» RAD 2014 (Сербия, 2014 г.), российских научных конференциях «Радиационная стойкость электронных систем» (Лыткарино, 2004-2014 гг.); научной

сессии НИЯУ МИФИ (Москва, 2004-2008, 2014 г. г.), научных конференциях «Электроника, микро–и наноэлектроника» (Вологда 2005 г., Гатчина 2006 г., Пушкинские Горы 2007 г., Петрозаводск 2008 г.)

Публикации: Основные результаты диссертации опубликованы в 16 научных работах (в период с 2008 по 2014 гг.), в том числе 7 в журналах из перечня ВАК и 5 в базе данных Scopus.

Объем и структура диссертации. Диссертация содержит 134 страницы, в том числе 72 рисунка, список литературы из 109 наименований и состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Анализ проблемной ситуации

Флэш-память в течение многих лет является одной из наиболее сильно масштабируемых технологий. Основными проблемами при масштабировании флэш-памяти является усиление взаимодействия зарядов соседних ячеек по мере их сближения, а также уменьшение величины заряда, хранимого на плавающем затворе. Для проектных норм от 16 нм и ниже число электронов на логический уровень исчисляется уже единицами.

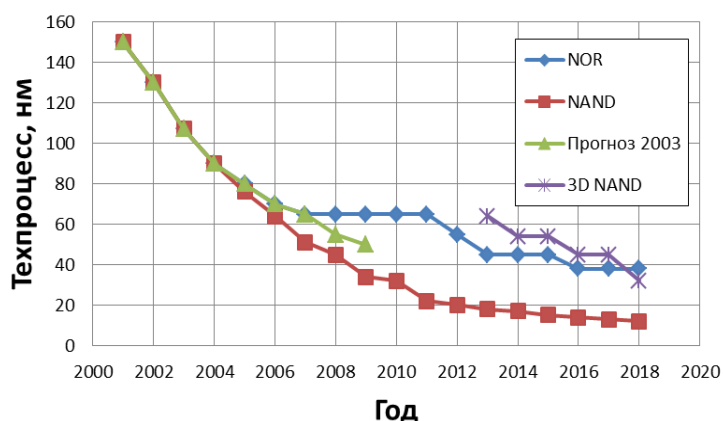


Рисунок 1 – Снижение проектных норм для различных типов микросхем флэш-памяти (по данным ITRS)

что флэш-память NAND используется для хранения большого объема данных (на данный момент максимальный объем на одном кристалле – 128 Гбит) и большим объемом рынка, в то время как для NOR-флэш-памяти хранение таких объемов не требуется. Также представлены данные по активно развивающейся технологии 3D-NAND флэш-памяти, которая использует вертикально расположенные ячейки с элементом хранения на основе ловушек заряда. Увеличение числа логических уровней ячейки флэш-памяти при значительном уменьшении количества хранимого заряда требует наличия сложных управляющих цепей для проведения операций записи и считывания.

На рисунке 1 представлены данные по снижению проектных норм для разных типов микросхем флэш-памяти с 2000 по 2014 годы, а также прогноз агентства International Roadmap for Semiconductors (ITRS) по их дальнейшему снижению. Как видно наиболее активно уменьшаются проектные нормы для флэш-памяти NAND-типа. Это обусловлено тем,

Описанные выше особенности технологий современных микросхем флэш-памяти приводят к изменению доминирующих механизмов функциональных отказов в современных микросхемах флэш-памяти. В результате того, что для изменения логического состояния ячейки памяти достаточно очень малой потери заряда, функциональные отказы, связанные с искажением записанной информации в результате потери заряда в ячейках памяти происходят зачастую уже при уровне накопленной дозы 10 крад и при значениях ЛПЭ ОЯЧ менее $5 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2 / \text{мг}$.

Таким образом, в результате проведенного автором анализа экспериментальных данных по радиационной стойкости современных микросхем флэш-памяти иностранного и отечественного производства установлено и обосновано существенное снижение стойкости флэш-памяти, изготовленной с проектными нормами от 200 до 32 нм, к воздействию ИИ КП в режимах, ранее рассматриваемых как некритичные (хранение в активном и пассивном режимах, считывание). Причиной снижения стойкости является потеря заряда с элемента хранения при воздействии ОЯЧ, либо его компенсации зарядом в диэлектрических слоях ячейки памяти при дозовом воздействии.

При контроле сохранности информации в ячейках флэш-памяти критичным режимом может являться как пониженное, так и повышенное напряжение питания, т.к. при считывании из накопителя на управляющий затвор транзистора ячейки подается напряжение питания и считывающая схема определяет величину тока стока как показано на рисунке 2. При меньшем питании эта величина будет меньше и частично разряженная ячейка, порог которой находится в пограничном состоянии, будет считана как запрограммированная. Это справедливо при контроле нарушений сохранности информации как при дозовом воздействии, так и при воздействии ОЯЧ.

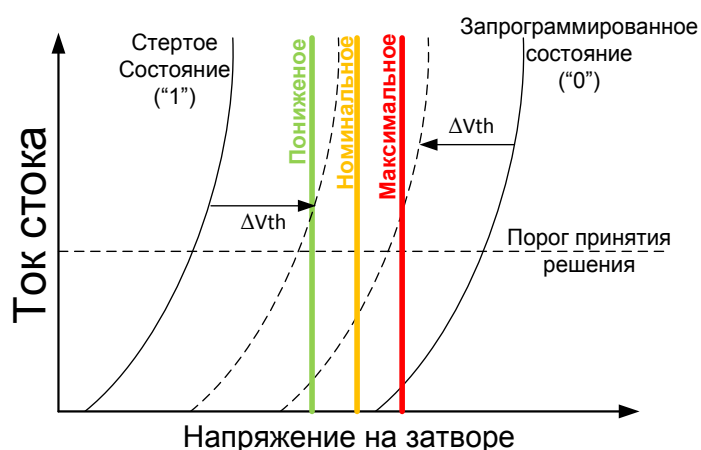


Рисунок 2 – Зависимость тока стока от напряжения на управляющем затворе для ячейки в запрограммированном («0») и стёртом состояниях («1») (типовая ситуация для флэш) и ячейка с частично потерянным зарядом – пунктирная кривая

Обычно уровень стойкости КМОП-микросхем при облучении в пассивном режиме выше, чем в активном, т.к. при подаче питания в диэлектрических слоях транзисторов создается электрическое поле, усиливающее «растаскивание» заряда, образованного при

ионизации. В ячейках флэш-памяти электрическое поле в окружающих элемент хранения диэлектриках создается благодаря наличию заряда на элементе хранения, при этом величина этого поля будет неизменна для активного и пассивного режимов хранения, так как потенциалы на выводах ячейки в данном случае нулевые. Таким образом, для микросхем флэш-памяти, уровень стойкости которых определяется стойкостью ячеек памяти, не стоит ожидать улучшений в пассивном режиме.

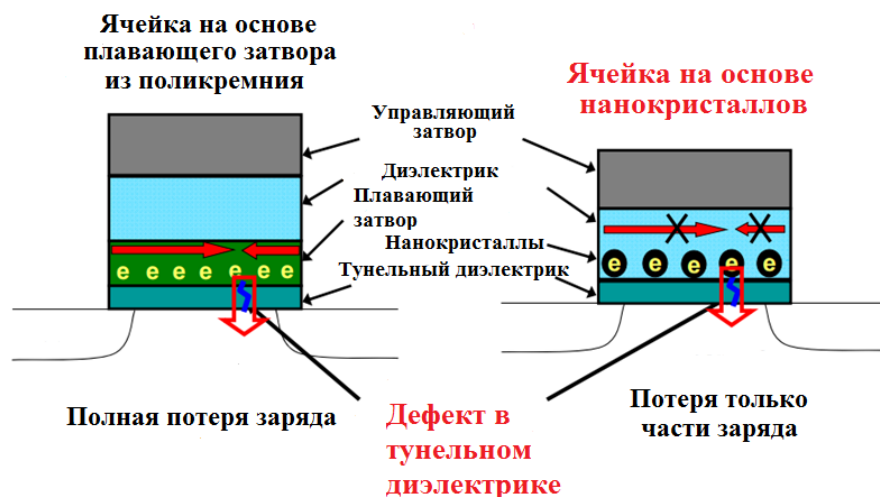


Рисунок 3 – Стекание заряда с поликремниевого затвора и слоя нанокристаллов

проводящим плавающим затвором. Таким образом, данные ячейки потенциально могут обладать более высокой стойкостью к воздействию ИИ КП. Однако, проведенные автором исследования коммерческих образцов флэш-памяти изготовленных по технологии Mirror-Bit© 200 нм на основе ячеек с элементом хранения из нитрида кремния показали, что пороговые ЛПЭ ОЯЧ для эффекта потери информации составляют менее $5 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2 / \text{мг}$, а уровень стойкости к дозовым воздействиям составляет около 20 крад.

В таблице 1 представлены основные изменения в механизмах функциональных отказов микросхем флэш-памяти при воздействии ИИ КП, установленные автором в ходе анализа результатов исследований и доступных литературных источников. Данные изменения необходимо принимать во внимание при разработке методик проведения исследований стойкости микросхем флэш-памяти к воздействию ИИ КП. В силу того, что подробные данные по технологии производства являются коммерческой тайной, невозможно даже предположительно определить какой режим работы будет являться наиболее критичным для той или иной микросхемы. Поэтому методики проведения исследований должны быть достаточно универсальными и позволять проводить оценки стойкости микросхем флэш-памяти независимо от технологии производства.

Отдельно стоит рассмотреть ячейки флэш-памяти в которых заряд хранится в непроводящем слое нитрида или нанокристаллов. Как показано на рисунке 3, дефект в туннельном диэлектрике в таких ячейках памяти не приводит к полному разряду ячейки, в отличие от ячеек с

Дополнительно следует отметить, что в современных микросхемах флэш-памяти, как и в микросхемах прошлых поколений часто наблюдается функциональные отказы флэш-памяти в режиме стирания и программирования. Данный вид отказа происходит в результате деградации параметров высоковольтных транзисторов генератора повышенного напряжения при воздействии ИИ КП.

Таблица 1 – Эволюция наблюдаемых механизмов функциональных отказов за последние 5 лет

До момента начала работы над диссертацией (прошрое поколение)	Современное состояние (получено при участии автора)
Стойкость ячеек к дозовому воздействию составляет не менее 100 крад, уровень стойкости определяется отказом генератора повышенного напряжения	Отказы ячеек памяти наблюдаются уже при уровне воздействия 10 крад. В некоторых микросхемах генератор повышенного напряжения сохранял свои функции до уровня 600 крад.
Одиночные сбои в одноуровневых ячейках памяти не проявляются при воздействии ОЯЧ со значениями значений ЛПЭ ниже 30 МэВ·см ² /мг	Пороговые ЛПЭ ТЗЧ для эффекта потери информации в одноуровневых ячейках флэш-памяти могут составлять менее 5 МэВ/см ² ·мг.
Стойкость в пассивном режиме работы заведомо выше	Отказы ячеек памяти в пассивном режиме работы проявляются при тех же уровнях дозового воздействия, что и активном режиме, при этом возможны отказы после цикла отключения и включения питания
При потере заряда в ячейках памяти возможны переходы ячейки только из состояния логического «0» в состояние логической «1»; наиболее критичным при контроле сохранности информации в ячейках является код «поле 0»	В современных микросхемах флэш-памяти наблюдаются как переходы «0»→«1» так и «1»→«0». Это обусловлено тем, что при хранении «1» на плавающий затвор помещается избыток дырок, в то время как в прошлых поколениях флэш-памяти ячейка в состоянии «0» имела нейтральный заряд
Ячейки памяти, использующие в качестве элемента хранения заряда непроводящие слои являются потенциально более стойкими к воздействию ИИ КП за счет меньшей чувствительности к утечкам заряда через окружающие слои диэлектриков	Пороговые ЛПЭ в ячейках флэш-памяти с элементом хранения заряда на основе нитрида, выполненных с проектными нормами 200 нм, составляют менее 5 МэВ·см ² /мг

Инженерная модель потери заряда в ячейках микросхем флэш-памяти при воздействии тяжелых заряженных частиц

Представленные выше результаты проведенного автором анализа показали, что одиночные эффекты в ячейках флэш-памяти, приводящие к нарушению сохранности записанной информации являются в современных микросхемах флэш-памяти с проектными нормами менее 200 нм одним из основных видов функциональных отказов от воздействия ТЗЧ. С учетом потенциально низких пороговых ЛПЭ этого вида одиночного эффекта (менее $5 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$) актуальной является задача расчетной оценки параметров чувствительности на этапе проектирования флэш-памяти.

Автором предложена инженерная модель для оценки потерянного заряда с плавающего затвора в результате воздействия заряженной частицы, основанная на механизмах, описанных в модели переноса носителей (авторы N. Z. Butt и M. A. Alam) с использованием зависимостей распределений энергий электронов и дырок от времени с момента пролета заряженной частицы. Предложенная модель обосновывает применение классической статистики Максвелла-Больцмана для оценки втекающих и вытекающих потоков частиц и позволяет избежать трудоемкого численного моделирования связанного с нахождением решения кинетического уравнения Больцмана.

Предложенная инженерная модель основывается на следующих допущениях:

1) В начальный момент времени вдоль трека ТЗЧ, прошедшей через ячейку образуется плазма горячих электронов и дырок плотностью порядка 10^{19} см^{-3} и выше и имеющая форму цилиндра.

2) Энергетическое распределение электронов и дырок устанавливается за время порядка 1 фс после пролета частицы за счет электрон-электронного и электронно-дырочного рассеяния и далее сравнительно медленно возвращается к термодинамически равновесному (термализуется). Это позволяет ввести значение электронной температуры. При этом только электроны с энергией больше высоты потенциального барьера $E_0 = 3,1 \text{ эВ}$, могут переходить через границу плавающий затвор – диэлектрик. Электроны с такой энергией можно рассматривать как невырожденный газ, для которого можно использовать статистику Максвелла-Больцмана с некоторой эффективной температурой.

3) Также предполагается, что распределение является пространственно-однородным и таким образом функция распределения плотности состояний не зависит от координат x, y, z .

Исходя из этих условий, было получено соотношение для расчета потока носителей через границу плавающий затвор-диэлектрик:

$$j = \frac{LET}{E_I} \cdot \sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m}} \left(1 + \frac{E_0}{kT_e} \right) e^{-\frac{E_0}{kT_e}} \quad (1)$$

где LET – линейные потери энергии заряженной частицы, E_I – средняя энергия образования электрон-дырочных пар (3,6 эВ), E_0 – высота барьера (3-3,1 эВ), k – постоянная Больцмана $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К), m – масса электрона ($9,1 \cdot 10^{-28}$ г), T_e – температура электронного газа.

При известных потоках ток разряда затвора J через обе границы плавающего затвора с диэлектриками будет определяться соотношением:

$$J = 2q(j(E_0, t) - j(E_0 + \Delta E, t)) \quad (2)$$

$$\Delta E = qFd_1 = q(V_T - V_{T0}) \frac{d_1}{d_1 + d_2} \quad (3)$$

где: d_1 – толщина туннельного диэлектрика, d_2 – толщина диэлектрика между управляющим и плавающим затворами, V_T – пороговое напряжение транзистора ячейки с зарядом на плавающем затворе, V_{T0} – пороговое напряжение транзистора ячейки в стертом состоянии. F – напряженность поля в диэлектрике, j – поток носителей через границу плавающий затвор-оксид, ΔE – разница между величиной потенциального барьера в запрограммированном и стертом состоянии, q – заряд электрона.

При верификации модели было получено удовлетворительное соответствие расчетных значений, полученных с применением представленной инженерной модели с доступными в литературных источниках экспериментальными данными по облучениям специализированных тестовых структур транзисторов с плавающим затвором (рисунок 4).

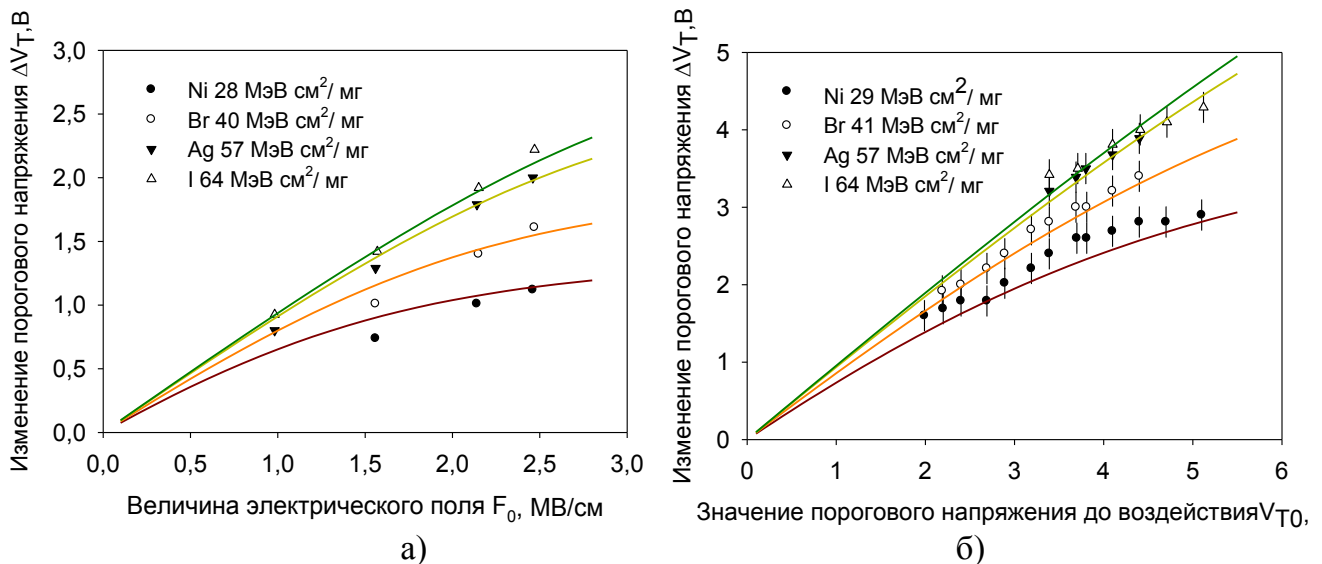


Рисунок 4 – Зависимость изменения порогового напряжения транзистора с плавающим затвором: а) от величины электрического поля в диэлектрике; б) от значения порогового напряжения транзистора ячейки до воздействия (точки – экспериментальные результаты, сплошные линии – расчет по инженерной модели)

Развитие методик экспериментальных исследования стойкости флэш-памяти к воздействию отдельных ядерных частиц по эффектам функциональных отказов

В развитие методик исследования функциональных отказов флэш-памяти от воздействия ОЯЧ автором предложена методика определения типовых видов функциональных отказов от воздействия ОЯЧ, основанная на анализе результатов выполнения специальной тестовой последовательности, и позволяющая экспериментально определять параметры чувствительности флэш памяти по каждому виду функционального отказа. Вид функционального отказа определяется по реакции флэш-памяти на действия для восстановления работоспособности микросхемы (таблица 2). Это дает возможность определять параметры чувствительности флэш-памяти по различным видам функциональных отказов и использовать эти данные для прогнозирования показателей стойкости флэш-памяти с учетом реального режима работы в аппаратуре.

Таблица 2 – Виды функциональных отказов в микросхемах флэш-памяти при воздействии ОЯЧ

Вид отказа	Проявление отказа при выполнении функциональных тестов	Действия для восстановления функционирования
Потеря информации в ячейке памяти/ сбой в буферном ОЗУ	Ошибка при считывании информации	Перезапись информации / повторное считывание
Сбой операции стирания	Флаг завершения операции стирания не выставляется. Ток потребления резко снижается	Аппаратный сброс или сброс питания. Перезапуск операции
Самопроизвольное стирание накопителя	Повышение тока потребления до значения в режиме стирания	Перезапись информации
Сбой операции записи	Ток потребления резко снижается Не выставляется флаг завершения операции	Аппаратный сброс или сброс питания. Перезапуск операции
Сбой считывания	Сбой в управляющей цепи. Все последующие циклы могут также быть с ошибками	Аппаратный сброс. Перезапуск операции или сброс питания
Сбой в хранении	Ток потребления повышается. Микросхема не отвечает на запросы	Сброс питания
Тиристорный эффект / Катастрофический отказ	Ток потребления повышается. Микросхема не отвечает на запросы	Сброс питания/Нет

Для последовательного выявления возможных одиночных функциональных отказов в процессе исследований, и получения информации для определения параметров чувствительности флэш-памяти, автором предложен оригинальный базовый алгоритм проведения исследований стойкости флэш-памяти от воздействия ОЯЧ (рисунок 5). Реальный алго-

ритм проведения исследований может варьироваться с учетом предполагаемых реальных режимов работы микросхемы в аппаратуре КА: например, этапы 4 и 5 можно исключить, если предполагается использовать микросхему только для хранения данных.



Рисунок 5 - Базовый алгоритм проведения исследований стойкости флэш-памяти к воздействию ОЯЧ по эффектам функциональных отказов

Отдельного внимания заслуживает этап 6 с использованием сфокусированного импульсного лазерного излучения, существенным преимуществом которого является возможность детерминированного воздействия только на одну выбранную локальную область кристалла флэш-памяти с последующим проведением функционального контроля до следующего воздействия. При воздействии потоков ОЯЧ моделирующих установок (ионов и протонов) частицы могут воздействовать на разные области и практически одновременно вызывать возникновение разных эффектов, один из которых может препятствовать регистрации другого. Таким образом, с помощью применения лазерных методов для эффектов, выявленных на ускорителях частиц, можно определить чувствительные области на кристалле, в которых возникает одиночный эффект, уточнить сечение и пороговые ЛПЭ ОЯЧ одиночного эффекта, используя процедуру совместной обработки экспериментальных данных, полученных на ускорителе ионов и лазерных установках.

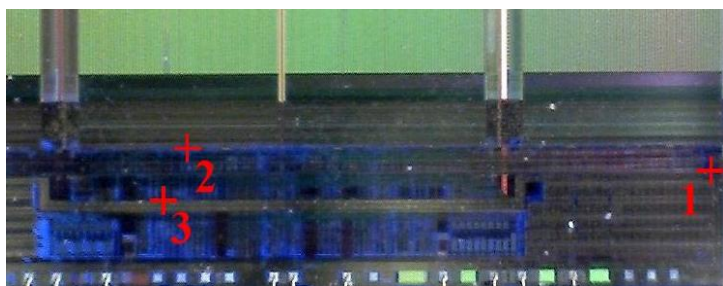


Рисунок 6 – Локализованные с помощью применения лазерных методов области возникновения различных видов функциональных отказов

На рисунке 6 показан пример результата использования данного подхода: локализация трех областей микросхемы K9WAG08U0M, в которых проявлялись разные виды функциональных отказов: 1 – тиристорный эффект, 2 – функциональный сбой в виде зависания микросхемы, 3 – катастрофический отказ половины накопителя.

Развитие методик экспериментальных исследований микросхем флэш-памяти при дозовом воздействии по эффектам функциональных отказов

На рисунке 7 представлен разработанный автором оригинальный базовый алгоритм проведения исследований дозовой стойкости флэш-памяти по функциональным отказам. Базовый алгоритм определяет необходимую последовательность проведения тестовых процедур, основанных на методиках исследования конкретных видов функциональных отказов при дозовом воздействии, позволяющих дать наиболее полную оценку стойкости микросхем флэш-памяти и выявить узел микросхемы, в котором произошел функциональный отказ с учетом реальных режимов работы.

Предлагаемое развитие методик исследования конкретных видов функциональных отказов флэш-памяти при дозовом воздействии основывается на учете влияния условий проведения исследований (напряжения питания (в том числе пассивный режим), тестовый

информационный код, последовательность режимов работы) на функционирование ячейки памяти при воздействии ионизирующего излучения.

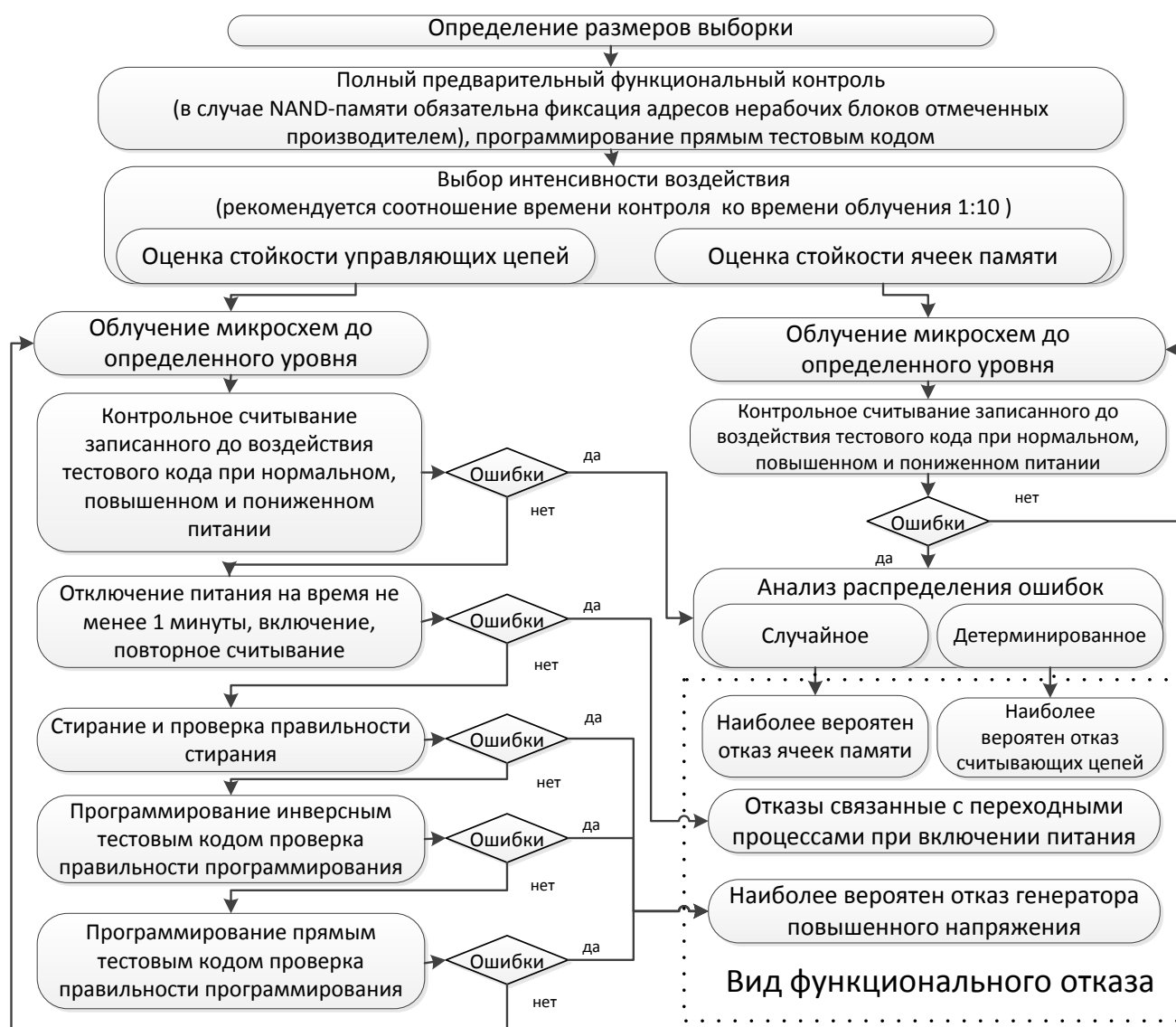


Рисунок 7 – Базовый алгоритм проведения исследований функциональных сбоев в микросхемах флэш-памяти при дозовом воздействии

Основные положения, которые легли в основу улучшенных методик исследования конкретных видов функциональных отказов флэш-памяти при дозовом воздействии и базового алгоритма проведения исследований дозовой стойкости флэш памяти, следующие:

1) Корректную оценку стойкости ячеек микросхем флэш-памяти можно дать только по результатам проведения облучения и контроля в режимах хранения и считывания исключая режим программирования, в противном случае можно завысить стойкость ячеек памяти, т.к. при проведении перезаписи заряд в ячейках восстанавливается.

2) Контроль сохранности информации и правильности ее перезаписи необходимо проводить для крайних значений диапазона напряжений питания, т.к. данный режим будет

наиболее чувствительным к сдвигу порогового напряжения транзистора ячейки, на затвор которого при считывании подается напряжение питания.

3) При проведении тестирования необходимо использование тестовых кодов, со случайным распределением информации по накопителю с одинаковым числом «0» и «1» для выявления отказов в считывающих цепях микросхем флэш-памяти.

4) Одним из основных свойств микросхем флэш-памяти является энергонезависимость и режим работы с периодическим отключением питания является наиболее приближенным к реальным условиям. Поэтому необходимо проводить проверку сохранности информации и восстановления полной работоспособности микросхемы после цикла кратковременного отключения питания.

В ходе апробации базового алгоритма проведения исследований дозовой стойкости флэш памяти было выявлена возможность и предложена методика повышения стойкости флэш-памяти в аппаратуре КА при дозовом воздействии путем периодического обновления информации, при котором происходит восстановление заряда в ячейках флэш-памяти. Это приводит к увеличению дозы отказа по потере информации, которая, как правило, ниже дозовой стойкости управляющих схем и определяет дозовую стойкость в современных микросхемах флэш-памяти.

Аппаратно-программный комплекс

Информационная емкость современных микросхем флэш-памяти на одном кристалле составляет до 128 Гбит. Для тестирования таких объемов памяти при проведении исследований функциональных отказов в микросхемах флэш-памяти необходимо обеспечить как можно большую скорость обмена данными для уменьшения времени эксперимента. Автором был разработан аппаратно-программный комплекс, позволяющий проводить тестирование микросхем флэш-памяти объемом до 1 Тб с частотой обмена данными 10 Мбит/с. Структурная схема представлена на рисунке 8.

Аппаратно-программный комплекс реализован с использованием открытой модульной архитектуры PXI ф.National Instruments с использованием программируемых модулей PXI-7951R FlexRIO на основе ПЛИС семейства Virtex-5 с тактовой частотой до 200 МГц и модулей задания уровней цифровых сигналов NI 6581. Автором было разработано программное ядро для ПЛИС реализующее на аппаратном уровне специфические протоколы обмена данными с микросхемами флэш-памяти NOR типа с последовательными и параллельными интерфейсами и флэш-памяти NAND типа. Комплекс обеспечивает число цифровых линий ввода-вывода до 112 с возможностью задания входных уровней в диапазоне

1,8–5,5 В. При этом комплекс является достаточно гибким и при необходимости позволяет легко наращивать предельный объем тестируемой памяти путем добавления дополнительных модулей.

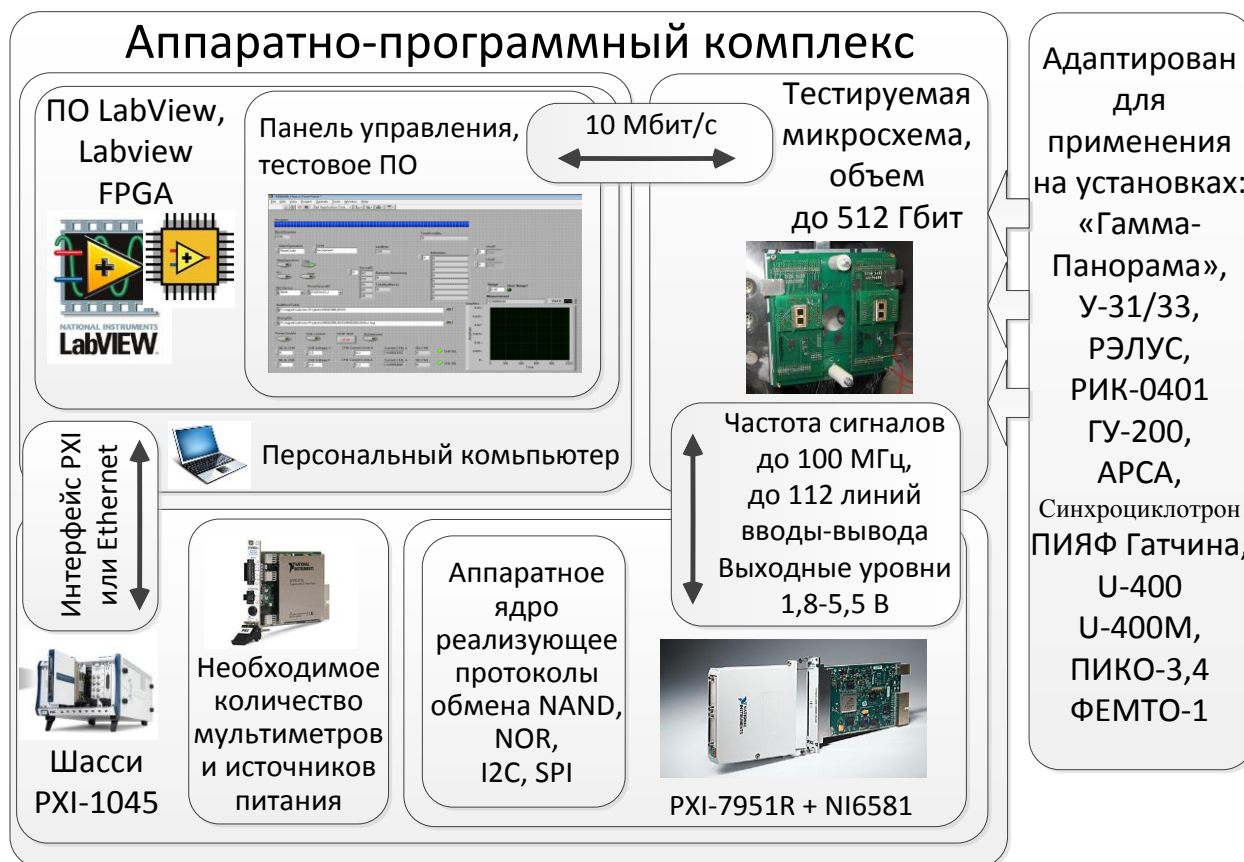


Рисунок 8 – Структурная схема аппаратно-программного комплекса

Тестирующее оборудование комплекса может быть размещено на расстоянии до 2 м от источника излучения. Такого расстояния достаточно для защиты оборудования от воздействия ионизирующего излучения. Связь с оборудованием осуществляется по протоколу Ethernet, что позволяет оператору находиться на безопасном расстоянии от источника излучения и осуществлять мониторинг параметром и управление функциональным контролем в режиме реального времени. Комплекс успешно использовался при проведении исследований на установках: «Гамма-Панорама»; У-31/33; РЭЛУС; РИК-0401; ГУ-200; АРСА; Синхроциклотрон (ПИЯФ Гатчина); У-400; У-400М; ПИКО-3, 4; ФЕМТО-1.

С применением данного комплекса на указанных установках были проведены испытания более 60 типов микросхем флэш-памяти и тестовых структур, отечественных и зарубежных производителей (ОАО «НИИМЭ и Микрон», ЗАО «ПКК Миландр», ОАО «Ангстрем», Intel-Micron, Samsung, Spansion, Atmel, Toshiba, SST, 3D plus и др.), выполненных с

проектными нормами от 32 нм до 300 нм, NOR и NAND типов, с параллельными и последовательными (I²C, SPI) интерфейсами, с различными вариантами реализации ячеек памяти (с плавающим затвором и непроводящем слоем нитрида кремния).

С применением разработанных базовых алгоритмов получены оригинальные результаты экспериментальных исследований стойкости к воздействию ИИ КП микросхем флэш-памяти основных производителей в разных режимах работы. Проведена систематизация и анализ полученных данных, выявлены характерные функциональные отказы для микросхем флэш-памяти отдельных производителей. К примеру, для микросхем флэш-памяти производства ф. Micron выявлена тенденция к снижению дозовой стойкости ячеек памяти с уменьшением проектных норм в результате потери заряда и повышению стойкость управляющих узлов микросхемы (рисунок 9).

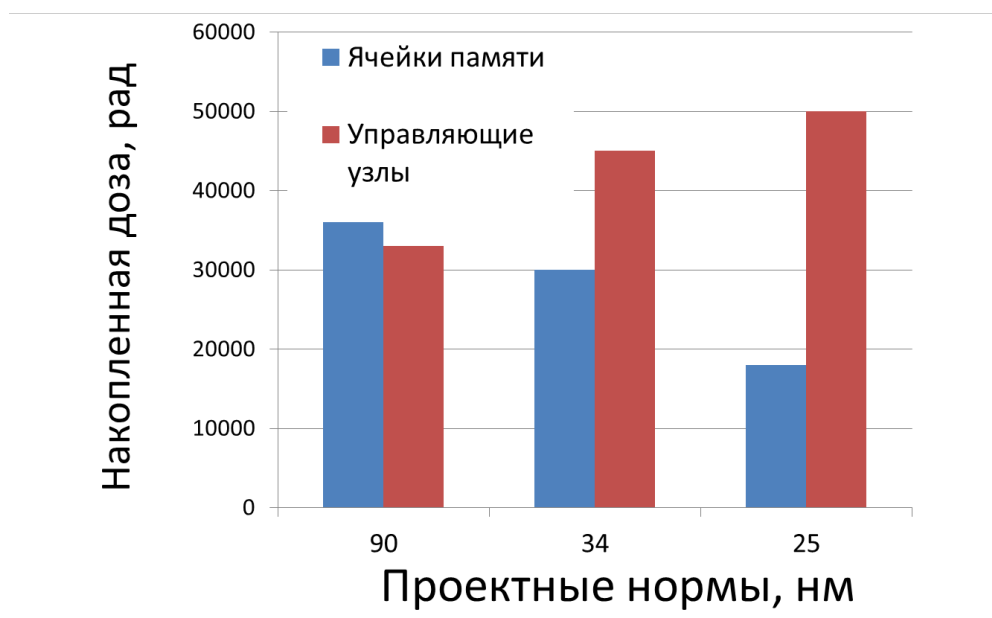


Рисунок 9 – Уровни стойкости к дозовому воздействию для микросхем флэш-памяти ф. Micron изготовленных с различными проектными нормами

Предложена методика повышения стойкости к дозовому воздействию для микросхем в которых нарушение сохранности информации вызвано потерей заряда с элемента хранения, позволяющая повысить дозовую стойкость по эффектам потери информации в ячейках флэш-памяти до уровня дозовой стойкости управляющих схем путем проведения перезаписи информации. Данная методика апробирована на не менее 5 типах.

Для микросхем флэш-памяти производства ф. Spansion (около 10 типов) выявлен характерный функциональный отказ от воздействия ОЯЧ, приводящий к стиранию записанной информации. Предложена и апробирована в ходе проведения исследований методика

повышения стойкости флэш-памяти в аппаратуре КА к данному виду функциональных отказов путем установки аппаратной защиты от записи.

Заключение

Основным результатом диссертации является решение актуальной научно-технической задачи развития методик и аппаратно-программного комплекса для экспериментальных исследований функциональных отказов микросхем флэш-памяти вследствие дозовых и одиночных эффектов от воздействия ионизирующих излучений космического пространства.

Основные научные результаты диссертации заключаются в следующем:

1. Предложена оригинальная инженерная модель потери заряда в ячейке флэш-памяти при воздействии ТЗЧ, позволяющая проводить расчетную оценку пороговых ЛПЭ для эффекта потери информации в ячейке флэш-памяти при известной толщине окружающих плавающий затвор диэлектриков и площади плавающего затвора путем обоснованного применения классической статистики Максвелла-Больцмана для оценки разницы втекающих и вытекающих потоков частиц.

2. Развита методика экспериментальных исследований функциональных отказов флэш-памяти от воздействия ИИ КП по дозовым и одиночным эффектам, учитывающие влияние условий проведения исследований, напряжения питания (в том числе пассивный режим), тестовый информационный код, последовательность режимов работы на функционирование ячейки памяти при воздействии ионизирующего излучения.

3. Предложены оригинальные базовые алгоритмы проведения исследований стойкости флэш-памяти к воздействию ИИ КП по дозовым и одиночным эффектам, позволяющие, получать данные о дозовой стойкости с учетом режима работы флэш-памяти в аппаратуре КА, а также экспериментальные данные по различным видам функциональных отказов при воздействии ОЯЧ.

Основные практические результаты диссертации и их внедрение:

1. Разработана и апробирована методика определения вида функциональных отказов при воздействии ОЯЧ с использованием ускорителей заряженных частиц и лазерных установок, позволяющая получать данные для определения параметров чувствительности флэш-памяти по каждому виду функционального отказа с учетом реального режима работы флэш-памяти в аппаратуре КА.

2. Показаны преимущества использования лазерных методов для экспериментальных исследований стойкости микросхем флэш-памяти по функциональным отказам управляющих цепей к воздействию ОЯЧ, позволяющие определять чувствительные области на кристалле, в которых возникает одиночных эффект, уточнять параметры чувствительности по одиночным эффектам, используя процедуру совместной обработки экспериментальных данных, полученных на ускорителе ионов и лазерных установках.

3. Разработан аппаратно-программный комплекс для автоматизированного тестирования флэш-памяти объемом до 1 Тб с частотой обмена данными 10 Мбит/с с учетом разработанных методик и базовых алгоритмов, который использовался в ходе работ по исследовании стойкости флэш-памяти на 11 различных испытательных установках.

4. Разработанные методические и технические средства внедрены в АО «ЭНПО СПЭЛС» и ИЭПЭ НИЯУ МИФИ при проведении радиационных испытаний и оценке стойкости микросхем флэш-памяти, комплектующих аппаратуру изделий 14Ф137 №3, 14Ф147 №2, 14Ф148, 47КС №3, 14Ф31 №13, Луч-5Б, Луч-5В №11 и других.

5. Проведены исследования радиационной стойкости более 60 типов микросхем флэш-памяти, изготовленных по различным технологиям (с проектными нормами от 300 до 32 нм) с различной реализацией элемента хранения информации (плавающий затвор, непроводящий слой нитрида, с различными материалами диэлектрических слоев ячейки). Полученные автором результаты исследований микросхем флэш-памяти S29GL064N, с применением разработанных методик внедрены в ОАО «НИИ ТП» при обеспечении сбоеустойчивости аппаратуры изделия 14Ф147 №2.

6. Предложена и апробирована методика повышения стойкости флэш-памяти в аппаратуре КА при дозовом воздействии, позволяющая повысить дозовую стойкость по эффектам потери информации в ячейках флэш-памяти до уровня дозовой стойкости управляющих схем.

7. Результаты диссертации вошли в отчетные материалы по ряду НИР и СЧ ОКР («Остров», «Кружево», «Память-2», «Такт-4М», «СРВ906-ТЗЧ» «Спектр-РГ-СВВ», «14К035-ТЗЧ», «Перспектива-3» и др.), выполненных по заказам Минобороны РФ, Минпромторга, Роскосмоса и предприятий промышленного, оборонного и космического комплексов.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

1. A. G. Petrov, A. L. Vasil'ev, A.V. Ulanova, A. I. Chumakov, and A.Y. Nikiforov, "Flash memory cells data loss caused by total ionizing dose and heavy ions," Central European Journal of Physics, vol. 12, no. 10, pp. 725-729, 2014.
2. M. S. Gorbunov, P. S. Dolotov, A. A. Antonov, G. I. Zebrev, V. V. Emeliyanov, A. B. Boruzdina, A. G. Petrov, and A. V. Ulanova, "Design of 65 nm CMOS SRAM for Space Applications: A Comparative Study," //IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 61, no. 4, pp. 1575-1582, 2014.
3. А.Г. Петров. «Регистрация функциональных сбоев, приводящих к стиранию информации во флэш ЗУ при воздействии одиночных ядерных частиц и способ защиты»// Научная сессия НИЯУ МИФИ-2014. Аннотации докладов. – М.: НИЯУ МИФИ, том 2, 2014, с. 50.
4. А.Г. Петров. «Влияние ионизирующих излучений на сохранность информации в ячейках флэш-памяти»// 17-я Международная телекоммуникационная конференция молодых ученых и студентов «МОЛОДЕЖЬ И НАУКА». Тезисы докладов. – Ч.1.М.: НИЯУ МИФИ, 2014, с.86-87.
5. А.Г. Петров, А.В. Уланова, А.И. Чумаков, А.Л. Васильев. «Исследования потери информации в микросхемах флэш-памяти в активном и пассивном режимах при ионизирующем воздействии» // Радиационная стойкость электронных систем – «Стойкость-2014», выпуск 17, Москва 2014, стр. 175-176.
6. А.Г. Петров, А. Б. Боруздина, А.В. Уланова, О.М. Орлов, В.А. Вавилов. «Исследование поведения «окна памяти» тестовых транзисторов с плавающим затвором при дозовом воздействии » // Радиационная стойкость электронных систем – «Стойкость-2014», выпуск 17, Москва, 2014, стр. 173-174.
7. А.Г. Петров. «Дозовые эффекты обратимой потери информации в ячейках флэш-памяти» // Радиационная стойкость электронных систем – «Стойкость-2013», выпуск 16, Москва, 2013, стр. 161-162.
8. А.Г. Петров, А. В. Яненко, А.Л. Васильев, А.И. Чумаков. «Поведение тока потребления микросхем флэш-памяти при возникновении эффектов сбоев типа SEFI» // Радиационная стойкость электронных систем – «Стойкость-2013», выпуск 16, Москва, 2013, стр. 163-164.
9. Д.В. Бобровский, Г.Г. Давыдов, А.Г. Петров, А.В. Яненко, О.А. Ахметов, А.Б. Боруздина, О.А. Калашников, Л.Н. Кессаринский, П.В. Некрасов, А.Ю.Никифоров. Реализация базовых методов радиационных испытаний ЭКБ на основе аппаратно-программного комплекса аппаратуры National Instruments // «Известия вузов. Электроника», №5(97), 2012 – М.: МИЭТ, 2012. – с. 91-104.
10. А.Б. Боруздина, А.И. Чумаков, А.Ю.Никифоров, А.Г. Петров. Выявление многократных сбоев в микросхемах СОЗУ от воздействия отдельных заряженных частиц космического пространства. // «Известия вузов. Электроника», №5(97), 2012 – М.: МИЭТ, 2012. – с. 44-48.

11. А.В.Согоян, А.В. Уланова, А.И.Чумаков, А.Ю.Никифоров, А.Г.Петров «Особенности оценки радиационной стойкости микросхем в специализированных защитных корпусах» //Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2012. Сборник трудов / под общ.ред.академика РАН А.Л.Стемпковского. – М.:ИППМ РАН, 2012, с. 584-587.
12. А. В. Яненко, А. О. Ахметов, Л. Н. Кессаринский, А. Г. Петров, А. А. Печенкин, Д. В. Савченков, Сравнительный анализ результатов исследований одиночных эффектов от отдельных ядерных частиц на различных испытательных установках, Научная сессия МИФИ-2011.
13. А.В. Уланова, А.Л.Васильев, А.Ю.Никифоров, А.Г.Петров, А.В.Яненко «Методические особенности радиационных испытаний микросхем памяти при воздействии импульсных и стационарных ионизирующих излучений // IX Межотрасл. конф. по радиационной стойкости: сб. докл.: в 2 т. Т.1 г. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2011, 371-389
14. А.Ю. Никифоров, П.К. Скоробогатов, А.И. Чумаков, А.В. Киргизова, А.Г. Петров, П.П. Куцько, А.В. Кузьмин, А.А. Борисов, В.А. Телец, В.Т. Пунин, В.С. Фигуров. Экспериментальные исследования адекватности лазерного имитационного моделирования объемных ионизационных эффектов в интегральных схемах и полупроводниковых приборах // //Микроэлектроника, 2009, т. 38, № 1, с. 4-20.
15. А.В. Киргизова, П.К. Скоробогатов, А.Ю. Никифоров, Л.Н. Кессаринский, Г.Г. Давыдов, А.Г. Петров Моделирование ионизационной реакции элементов КМОП КНС микросхем при импульсном ионизирующем воздействии //Микроэлектроника, 2008, том 37, № 1, с. 28-44.
16. Г.Г. Давыдов, А.В. Согоян, А.Ю. Никифоров, А.В. Киргизова, А.Г. Петров, А.Ю. Седаков, И.Б. Яшанин. Методика оперативного неразрушающего контроля дозовой стойкости КМОП БИС на КНС структурах // //Микроэлектроника, 2008, том 37, № 1, с. 67-77.