

На правах рукописи

Экз. №

ОРЛОВ АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТОЙКОСТИ  
СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАПОМИНАЮЩИХ УСТРОЙСТВ  
К ВОЗДЕЙСТВИЮ РАДИАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ**

05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

**Автореферат диссертации**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Автор:

Москва – 2012 г.

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

Научный руководитель      Доктор технических наук, профессор  
Телец Виталий Арсеньевич

Официальные оппоненты:    Доктор технических наук  
Синкевич Владимир Федорович  
Кандидат технических наук  
Стещенко Владимир Борисович

Ведущая организация:        ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт  
автоматики имени Н.Л.Духова»

Защита состоится 21 мая 2012 г. в 15 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 17 апреля 2012 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 развитию методов и средств прогнозирования<sup>1</sup> и обеспечения радиационной стойкости сегнетоэлектрических запоминающих устройств (СЗУ), имеющей существенное значение для разработки перспективных высоконадежных электронных устройств вычислительной техники и систем управления космического и другого специального назначения, улучшения их функциональных и эксплуатационных характеристик.

### **Актуальность темы диссертации**

Проблема создания современных и перспективных высокоинтеллектуальных систем космической техники (КТ), стойких к воздействию ионизирующего излучения (ИИ), является актуальной и может быть решена на основе применения радиационно-стойкой электронной компонентной базы (ЭКБ), важнейшими представителями которой являются микросхемы запоминающих устройств (ЗУ).

На момент постановки задачи исследований достаточно хорошо изучено радиационное поведение интегральных микросхем ЗУ, выполненных по объемной КМОП технологии (на комплементарных транзисторах металл-окисел-полупроводник – МОП). Установлены основные эффекты и механизмы отказов этих ЗУ и определены предельные уровни их стойкости при воздействии различных радиационных факторов. Уровни бессбойной работы (УБР) КМОП ЗУ, выполненных по объемной технологии при импульсных ионизирующих воздействиях (ИИВ) составляет  $10^8$ - $10^9$  ед/с, а пороги дозовых отказов -  $10^4$ - $10^5$  ед. Однако такие уровни стойкости являются недостаточными для обеспечения требований, предъявляемых к аппаратуре КТ.

Современные отечественные радиационно-стойкие микросхемы ЗУ, выполненные по технологии с диэлектрической изоляцией элементов (КНС – кремний на сапфире и КНИ – кремний на изоляторе), наряду с высокой стойкостью к ИИВ (до  $10^{11}$  ед/с) характеризуются относительно низкой дозовой стойкостью, сопоставимой с КМОП ЗУ.

При применении традиционных ЗУ необходимо также учитывать существующие эксплуатационные ограничения: для оперативных запоминающих устройств (энергозависимость), для ПЗУ (большое время записи, ограниченное число циклов записи-считывания информации и небольшой срок сохранности информации). Итогом многолетнего развития схемотехники энергонезависимых ЗУ с электрическим стиранием

---

<sup>1</sup> В данной работе под понятием прогнозирование понимается предвидение технического результата на основе расчетно-экспериментального моделирования радиационных реакций СЗУ

информации являются перепрограммируемые ЗУ, сохраняющие данные при отключении напряжения питания (ФЛЭШ ЗУ), однако радиационная стойкость накопителя и периферийных цепей этих ЗУ определяется, как правило режимом стирания, и недостаточна для выполнения требований тактико-технических заданий (ТТЗ) при разработке изделий КТ.

Эти обстоятельства вынуждают разработчиков искать новые пути и подходы к повышению эксплуатационных характеристик и радиационной стойкости.

Одна из перспективных технологий радиационно-стойких ЗУ основана на использовании эффекта спонтанной поляризации сегнетоэлектрических материалов и создании на их основе СЗУ (Ferromagnetic Random Access Memory - FRAM). Иностранные фирмы-изготовители рекламируют СЗУ, как энергонезависимые оперативные запоминающие устройства (ОЗУ), с практически неограниченным числом циклов записи-считывания информации, высоким быстродействием и большим сроком сохранности данных, с низкой потребляемой мощностью и потенциально высокой радиационной стойкостью.

Результаты анализа применимости ЭКБ иностранного производства (ИП) при разработке изделий КТ, показывают устойчивую тенденцию роста применения СЗУ (рисунок 1). СЗУ ИП с объемом памяти до 256 К широко применяются в изделиях КТ.



Рисунок 1 – Динамика применяемости СЗУ ИП в изделиях КТ

В то же время анализ имеющейся информации показал, что до настоящего времени исследования СЗУ в условиях воздействия радиационных факторов имеют частный характер и не систематизированы. Представленные в литературе материалы исследований и экспериментальные данные в основном сводятся к описанию наблюдаемых радиационных эффектов в сегнетоэлектриках и в примитивных структурах на их основе. Отсутствуют достоверные экспериментальные данные о радиационной стойкости микросхем СЗУ. Практически не исследованы доминирующие эффекты и механизмы повреждения и отказов базовых элементов микросхем СЗУ при воздействии различных радиационных факторов и их зависимости от конструктивно-технологических особенностей, режимов и условий эксплуатации. Отсутствуют типовые методики испытаний и оценки радиационной стойкости СЗУ с использованием моделирующих установок и имитаторов. В частности, не обоснована возможность и не исследованы особенности и границы применимости имитационных испытаний с учетом специфики СЗУ.

Поэтому возникла актуальная научная задача, которая заключается в необходимости развития существующих и разработки новых методов и средств прогнозирования и обеспечения радиационной стойкости СЗУ.

#### **Состояние исследований по проблеме.**

Вопросам создания и развития микросхем сегнетоэлектрических ОЗУ посвящено значительное число работ, начиная с середины восьмидесятых годов. С 1991 года в соответствии с государственным оборонным заказом в НПО «Адрон» проводилась НИР «Исследование и разработка энергонезависимых ЗУ с произвольной выборкой с использованием сегнетоэлектриков, устойчивых к СВВФ по группе ЗУ», шифр «Радиян». Предприятием была разработана рабочая конструкторская документация, но впоследствии работы из-за прекращения финансирования были приостановлены. С этого времени регулярно публиковалась информация о частных результатах проводимых исследований в данном направлении, однако ни конкретных описаний микросхем, ни данных по их радиационной стойкости так и не появилось.

Вопросам создания радиационно-стойких запоминающих устройств, выполненных по КМОП и КНС (КНИ) технологиям, посвящены многочисленные работы к.т.н. Машевича П.Р., Гуминова В.Н. (ОАО «Ангстрем»), д.т.н. Барбашова В.М., к.т.н. Герасимова Ю.М., к.т.н. Григорьева Н.Г. (НИЯУ МИФИ).

Вопросам анализа, моделирования и разработки 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).

Значимый вклад в развитие методических и технических средств контроля параметров ЗУ в процессе дистанционных радиационных испытаний сделан в работах к.т.н. Беляева В.В., к.т.н. Калашникова О.А. (НИЯУ МИФИ), к.т.н. Фигурова В.С. и Емельянова В.В. (ФГУП «НИИП»), что обеспечило повышение объема испытаний, увеличения их информативности и достоверности. В наибольшей степени вопросы расчетно-экспериментального моделирования, прогнозирования и разработки методик радиационных испытаний ЗУ развиты в трудах д.т.н. Никифорова А.Ю., д.т.н. Чумакова А.И., к.т.н. Улановой А.В., к.т.н. Яненко А.В., к.т.н. Васильева А.В., представляющих научную школу НИЯУ МИФИ.

Поскольку функционально СЗУ близки к традиционным ЗУ по основным блокам кристалла, за исключением конструкции ячеек памяти (ЯП) при рассмотрении вопросов оценки и прогнозирования их радиационной стойкости в общем случае может быть использован накопленный опыт радиационных исследований обычных ЗУ. Однако при этом необходимо учитывать специфику радиационного поведения отдельных элементов СЗУ, функциональные и паразитные связи между ними с учетом высокой степени интеграции. Оригинальные технологические и топологические решения СЗУ требуют развития существующих методических и технических средств прогнозирования и оценки их радиационной стойкости.

Таким образом, к началу диссертационной работы возникло методическое противоречие – между появлением и широким практическим использованием нового перспективного класса микросхем памяти – СЗУ и недостаточной изученностью их доминирующих радиационных эффектов и механизмов отказов, а также отсутствием методик и систематизированных результатов их радиационных испытаний. Возникла необходимость выявить наиболее радиационно-чувствительные элементы и функциональные блоки СЗУ, определить типовые уровни отказов и сбоев СЗУ по доминирующим радиационным эффектам при воздействиях различных радиационных факторов, а также разработать рекомендации по повышению их радиационной стойкости.

**Целью** диссертации является повышение эффективности существующих и разработка новых научно обоснованных методических и технических средств прогнозирования и обеспечения радиационной стойкости элементов и функциональных узлов СЗУ по доминирующим радиационным эффектам ИИ.

Достижение указанной цели стало возможным на основе решения комплекса научно-исследовательских и прикладных **задач**, включающих:

- анализ тенденций развития СЗУ и особенностей применения в изделиях В и КТ с заданными требованиями по радиационной стойкости;

- проведение комплекса теоретических и экспериментальных исследований доминирующих радиационных эффектов в СЗУ и их элементах в широких диапазонах изменения режимов работы и уровнях ИИ;

- развитие методических и технических средств испытаний СЗУ на стойкость к ИИВ, обеспечивающих выявление и диагностирование информационных сбоев в реальном времени непосредственно в процессе и после испытательного воздействия;

- получение и систематизацию экспериментальных данных по радиационной стойкости СЗУ, установление закономерностей их радиационного поведения и разработке рекомендаций по обеспечению радиационной стойкости СЗУ;

- разработку рекомендаций по выбору и применению радиационно-стойких СЗУ в аппаратуре КТ.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

- установлено, что реакция микросхем СЗУ на радиационные воздействия определяется суперпозицией откликов радиационно-стойкого накопителя информации, состоящего из ячеек памяти (ЯП) на основе сегнетоэлектриков и стандартных периферийных элементов СЗУ, выполненных по объемной КМОП-технологии, и обуславливающих эффекты и закономерности радиационного поведения, характерные для КМОП технологии, определены наиболее критичные функциональные узлы, отвечающие за радиационный отклик микросхем СЗУ и экспериментально подтверждено, что радиационная стойкость СЗУ определяется не изменениями характеристик сегнетоэлектрика, а радиационно-индуцированной деградацией элементов периферии, что позволит разработчикам СЗУ провести мероприятия по повышению радиационной стойкости;

- впервые развита физическая модель сбоя сегнетоэлектрической ЯП при импульсном воздействии, позволяющая оценить уровень стойкости ЯП при воздействии различной формы, длительности и интенсивности ИИ в различные моменты временной диаграммы функционирования СЗУ; результаты моделирования позволили выявить критичный режим функционирования СЗУ и рассчитать вероятность возникновения сбоя в СЗУ при импульсном воздействии;

- впервые развита физическая модель импульсной реакции накопителя СЗУ на воздействие импульсного рентгеновского излучения (ИРИ) с энергией в диапазоне 10...200 кэВ, учитывающая радиационно-термические, термомеханические и пьезоэлектрические процессы, а также ионизационную проводимость сегнетоэлектрика. На основе расчетного моделирования показано, что уровень поглощенной дозы в сегнетоэлектрике при воздействии ИРИ превышает равновесное значение в кремнии более, чем на порядок из-за неоднородного энергосвечения в элементах СЗУ, при наличии в конструкции СЗУ материалов с большими атомными номерами (титанат-цирконат свинца, платина);

- научно обоснованы и методически сформулированы методики экспериментальных исследований СЗУ, развивающие существующие методы испытаний и контроля параметров и позволяющие выявлять наиболее радиационно-чувствительные элементы СЗУ, исследовать специфическое для СЗУ радиационное поведение и повышающие информативность исследований.

#### **Практическая значимость работы:**

- разработаны и апробированы методики экспериментальных исследований и испытаний микросхем СЗУ на моделирующих и имитирующих установках, обеспечивающие выявление специфических для СЗУ радиационных эффектов и повышающие информативность исследований;

- впервые проведены испытания более чем 10 типов микросхем СЗУ на стойкость к радиационному воздействию по всем основным видам эффектов (объемная ионизация, поглощенная доза, локальные радиационные эффекты при воздействии отдельных ядерных частиц (ОЯЧ));

- в ходе работы получены оригинальные результаты экспериментальных исследований СЗУ ведущих зарубежных изготовителей;



- результаты диссертации внедрены во ОАО «Ангстрем», ФГУП «ФНПЦ НИИИС имени Ю.Е.Седакова», ОАО «ЦНИИ «Циклон», ОАО «ЦНИИ «Комета», ОАО «ЭНПО СПЭЛС», филиале ФБУ «46 ЦНИИ Минобороны России» при разработке, методическом обеспечении, организации и проведении радиационных испытаний отечественных и зарубежных СЗУ, а также аппаратуры систем управления на их основе – в частности в космических системах;

- результаты диссертационной работы вошли в отчетные материалы по НИР и составным частям ОКР («Прочность», «Вереница», «Вельвет», «Локомотивщик», «Литературовед», «Лицей», «Личность-ку», «Дикарь», «Литгос-ку», «Лисичанск-ку», «Джут-ку»), выполненных по заказам Минобороны России и предприятий оборонного комплекса;

- полученные в диссертации результаты реализованы в нормативных документах: Минобороны России, в том числе в РД В 319.03.52 «Микросхемы интегральные и полупроводниковые приборы. Методы контроля радиационной стойкости на этапах разработки, производства и поставки. Общая методика лазерных имитационных испытаний в широком диапазоне уровней и длительностей импульсов специальных факторов, а также температуры среды», проекте РД госкорпорации «Росатом» «Методы оценки изделий микроэлектроники и наноэлектроники на радиационную стойкость к локальным радиационным эффектам при воздействии факторов ядерного взрыва», а также в более чем 20 методиках и протоколах испытаний СЗУ.

### **Результаты, выносимые на защиту:**

1. Физические модели прогнозирования функциональных сбоев и отказов микросхем СЗУ вследствие объемных ионизационных эффектов в широком диапазоне режимов и условий эксплуатации, отражающие приоритет реакций периферийных устройств над реакциями сегнетоэлектрических ЯП и учитывающие вклады, как функциональных элементов, так и паразитных структур;

2. Теоретически обоснованные и экспериментально подтвержденные результаты физического моделирования особенностей ионизационных эффектов в элементах накопителя СЗУ под действием ИРИ, включающего анализ вклада всех существенных процессов: радиационно-термических, термомеханических и пьезоэлектрических, а также ионизационной проводимости диэлектрика, показывающие, что при воздействии ИРИ

до уровня флюенса  $1 \text{ кал/см}^2$ , не обнаружено значительных бросков напряжения, связанных с генерацией и распределением механических возмущений;

3. Методики экспериментальных радиационных исследований микросхем СЗУ, развивающие существующие методы испытаний и контроля параметров и обеспечивающие выявление специфических для СЗУ радиационных эффектов и повышающие информативность исследований;

4. Результаты экспериментальных исследований радиационного поведения и испытаний СЗУ ведущих зарубежных изготовителей по объемным и дозовым эффектам, а также по эффектам от отдельных ядерных частиц, подтверждающие обоснованность предложенных методических и технических средств моделирования и прогнозирования радиационного поведения СЗУ, обеспечивающие достоверной информацией разработчиков изделий КТ.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертации докладывались на российских научных конференциях «Радиационная стойкость электронных систем» (Лыткарино, 2002-2010 гг.); научных сессиях МИФИ (Москва, 2001-2010 гг.); семинаре «Проблемы создания специализированных радиационно-стойких СБИС на основе гетероструктур», (г. Нижний Новгород, 2009-2011 гг.).

**Публикации:** Основные результаты диссертации опубликованы в 8 работах (в период с 2001 по 2011 гг.), в том числе 3 – в реферируемых журналах и 1 – без соавторов.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация содержит 133 страницы, в том числе 45 рисунков, 35 таблиц, список литературы из 102 наименований и состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

### **Содержание диссертации**

#### **Исследование применяемости, технического уровня и тенденций развития СЗУ отечественного и иностранного производства.**

#### **Постановка задачи диссертации**

Выполнение тактико-технических требований, предъявляемых к изделиям КТ, может быть обеспечено только на основе применения специальной радиационно-стойкой ЭКБ. Наиболее широкое применение типа СЗУ нашли в изделиях космической техники. В частности, они используются в блоке определения пространственной ориентации изделий, в инерциальной геоцентрической системе координат звезд, в аппаратуре

радионавигации, в блоке управления системой наведения антенн, в комплексе автоматики и стабилизации, командно-измерительной системе, бортовом информационно-вычислительном комплексе, аппаратуре дальномерно-доплеровской системы, аппаратуре сбора и передачи информации, бортовом синхронизирующем устройстве, командно-измерительной системе.

Разработчиками изделий КТ, при обосновании их выбора, указываются следующие свойства СЗУ: энергонезависимость, низкие управляющие напряжения, совместимые с КМОП-схемами обрамления, малые времена записи и чтения, длительные времена энергонезависимого хранения информации (не менее 5 лет), большое число циклов запись/чтение ( $10^{12}$ - $10^{14}$ ), а также доступность данного класса СБИС: множество изготовителей, разнообразие предлагаемых типонаминов при приемлемой стоимости. На сегодняшний день развитие технологии СЗУ входит в стратегические планы многих ведущих мировых производителей интегральных микросхем. Данные прогноза развития СЗУ ИП представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Прогноз изменения информационной емкости и технологий производства зарубежных СЗУ

Параметр	Год производства					
	2001	2004	2007	2010	2013	2016
Минимальный топологический размер элемента, нм	500	180	130	100	70	50
Емкость стандартного СЗУ, бит	1 М	64 М	256 М	1 Г	4 Г	16 Г
Время выборки адреса, нс	80	40	20	10	8	6
Время цикла, нс	160	70	32	16	12	10
Напряжение питания, В	3,0	1,8	1,2	1,0	0,7	0,7
Размер ячейки, мкм	15,0	0,52	0,17	0,15	0,04	0,02
Архитектура конденсаторной структуры	Планарная (planar)	Пьедестал (stack)	3D			
Архитектура ячейки СЗУ	2Т-2С	1Т-1С				
Минимальный заряд переключения, мкКл/см <sup>2</sup>	4,4	17,2	40,0			
Время хранения при 85 <sup>0</sup> С, лет	10					
Число циклов переключений	10 <sup>12</sup>	10 <sup>15</sup>	более 10 <sup>16</sup>			

Физический принцип хранения информации в электрически поляризованном

материале с широкой петлей гистерезиса обеспечивает высокую устойчивость СЗУ к внешним воздействиям<sup>2</sup>.

В настоящее время в СЗУ используют два основных материала: цирконат-титанат свинца – ЦТС (PZT -  $Pb(Zr, Ti)O_3$ ) и танталат висмута стронция – ТВС (SBT -  $SrBi_2Ta_2O_9$ ). В качестве материала электродов в основном применяется платина (Pt) с адгезионными подслоями титана (Ti) и оксида титана ( $TiO_2$ ), а также в комбинации с иридием (Ir).

Ведущими производителями освоено производство двух доминирующих классов ЯП СЗУ, отличающиеся по внутренней архитектуре: 1Т-1С и 2Т-2С, представленных на рисунке 2.

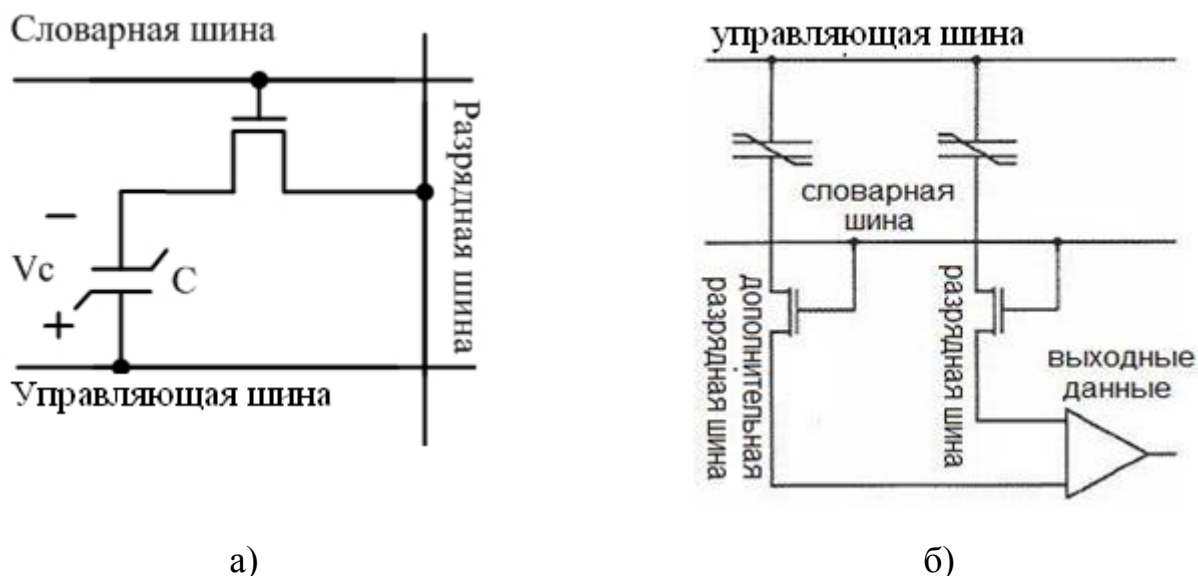


Рисунок 2 – Конструкции ячеек СЗУ с архитектурой 1Т-1С (а), 2Т-2С (б)

СЗУ с внутренней архитектурой 1Т-1С, как правило, используют для гражданского применения т.к. они более компактны и позволяют спроектировать схемы большей информационной емкости. Однако такой тип ячеек обладает существенным недостатком - на разрядной шине при считывании формируется слабый недифференциальный информационный сигнал. Обработка такого сигнала требует построения достаточно сложной схемы формирования опорного сигнала и усилителей считывания. Схемы такого типа обладают низкой помехозащищенностью и возможность их применения в изделиях КТ представляется сомнительной.

Кроме того, такая структура является менее устойчивой при радиационном воздействии вследствие потенциально низкого уровня бессбойной работы (УБР) схемы.

<sup>2</sup> Сегнетоэлектрический эффект – это возможность материала сохранять электрическую поляризацию в отсутствие внешнего электрического поля

Данных о производстве СЗУ ИП повышенных категорий качества (space, military) в литературе не обнаружено.

В СЗУ 2Т-2С две ячейки типа 1Т-1С программируются в противоположных направлениях и в ячейке имеются две разрядные линии с инверсными сигналами. Используется дифференциальный канал для восприятия сигналов, что повышает помехоустойчивость и надежность хранения данных. Основным преимуществом ЯП 2Т-2С СЗУ является высокая помехоустойчивость, а также потенциальная стойкость к воздействию магнитных и электромагнитных полей, а также ионизирующих излучений. Применение СЗУ данного типа ЯП обосновано для вычислительных средств, используемых при создании современных и перспективных высокоинтеллектуальных систем изделий КТ.

В настоящее время технология СЗУ значительно отстает от лидирующих производителей традиционных ЗУ. В связи с этим предполагается, что развитие параметров СЗУ в ближайшие годы будет идти ускоренными темпами с четырехкратным увеличением объема производства при уменьшении размеров в 1,5 раза.

Разработки отечественных радиационно-стойких СЗУ проводятся ОАО «Ангстрем» (PZT, информационная емкость до 1 М) и ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е.Седакова» (SBT, создание элементов СЗУ). В ОАО «Интеграл» (Республика Беларусь) проводится опытно-конструкторская работа «Исследование и разработка элементной базы для энергонезависимой памяти с сегнетоэлектрическим диэлектриком и разработка микросхемы FRAM ЗУ емкостью 64 К, зарубежный аналог FM24C256-ST, Ramtron», шифр «Сегмент-1», окончание 2013 г. Разработки СЗУ ориентированы на структуры ЯП 2Т-2С.

При массовом применении СЗУ ИП данные о радиационной стойкости в зарубежных источниках ограничены. При этом существуют определенные проблемы при применении СЗУ ИП в изделиях КТ:

- фирмы-изготовители при проектировании СЗУ не применяют радиационно-стойких библиотек элементов и не гарантируют при поставке высокой радиационной стойкости СЗУ ИП;

- отсутствуют данные о методиках проведения радиационных испытаний и контроле работоспособности СЗУ при испытаниях (контролируемые параметры и их значения);

- в иностранных источниках практически нет информации об уровнях радиационной стойкости СЗУ.

Проведенный анализ показывает, что в силу построения схем управления («периферии») СЗУ по стандартной КМОП технологии микросхемы СЗУ обладают потенциально высокой чувствительностью к воздействию ИИ. Необходимо решить задачу получения и систематизации данных о радиационной стойкости СЗУ, определению наиболее критичного режима функционирования и механизмов радиационных отказов СЗУ при радиационных воздействиях с выделением основных чувствительных узлов и режимов работы разных типов СЗУ.

Решение данной задачи сопряжено с разработкой общих методических подходов при исследовании радиационных характеристик СЗУ.

### **Анализ доминирующих механизмов отказов СЗУ вследствие радиационных эффектов**

Расчетно-экспериментальная оценка чувствительности СЗУ проводилась на основе концепции доминирующих радиационных эффектов, к которым относятся эффекты объемной ионизации, поверхностные (дозовые) эффекты, локальные одиночные радиационные эффекты. Раздельно проанализировано влияние радиационных эффектов на периферию и накопитель СЗУ.

Сбои СЗУ при воздействии импульсного ИИ связаны с потерей информации в выходных КМОП-каскадах усилителя считывания, изменениями выходных логических уровней, а также условиями работы интегральной схемы (ИС). Сбои выражались в переключении выходного уровня в противоположное состояние при статическом считывании данных (рисунок 3).

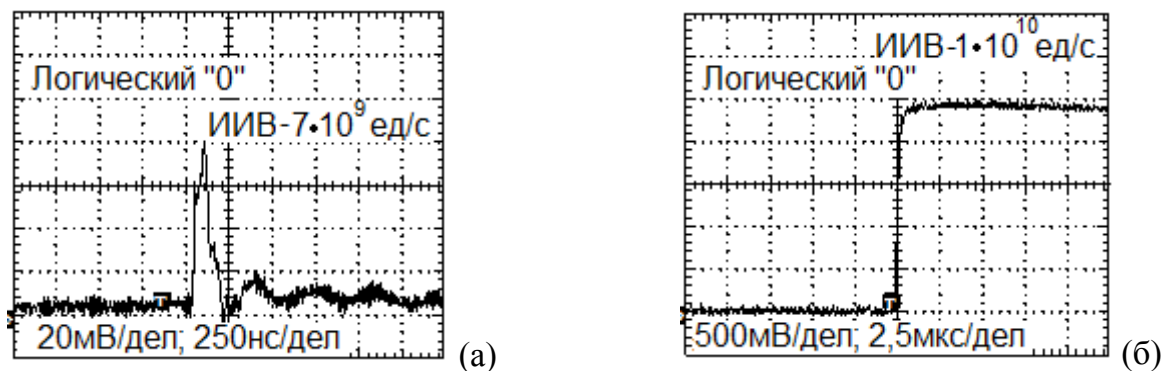


Рисунок 3 – Экспериментальные осциллограммы импульсной реакции выходных напряжений низкого логического уровня СЗУ MB85R256H, ф. Fujitsu Semiconductor (емкость 256 К) при разных значениях ИИВ:  $7 \cdot 10^9$  ед./с (а) и  $1 \cdot 10^{10}$  ед./с (б)

Повторное считывание без перезаписи ЯП приводило к восстановлению информации и верному считыванию, что может свидетельствовать о сбое в выходных КМОП-каскадах усилителя считывания, а не в накопителе. Характер радиационного отклика был нестабильным и, вероятно, зависел от момента ИИВ в рамках временной диаграммы.

Обобщение полученных расчетно-экспериментальных данных более 10 типов СЗУ показывает, что для большинства современных СЗУ, изготовленных по объемной технологии, УБР составляет  $1,1 \cdot 10^9 \dots 2,7 \cdot 10^{10}$  ед./с; уровни сохранности информации лежат в диапазоне величин  $2,7 \cdot 10^{10} \dots 7,5 \cdot 10^{11}$  ед./с (для сравнения: уровни сохранности КМОП БИС ОЗУ лежат в диапазоне  $1,02 \cdot 10^9 \dots 7,17 \cdot 10^{10}$ ); уровни тиристорного эффекта составляют  $1,0 \cdot 10^{11} \dots 7,5 \cdot 10^{11}$  ед./с (для КМОП БИС ОЗУ – от  $1,62 \cdot 10^8$  до  $8,6 \cdot 10^{11}$  ед./с).

Проведено расчетно-экспериментальное схмотехническое моделирование сбоев в ЯП СЗУ проведено с использованием программного комплекса «SOSR», адаптированного, при участии автора, и включало этап моделирования ЯП 2Т-2С и усилителя считывания. В качестве параметра, характеризующего ионизационный отклик транзисторов при ИИВ, в «SOSR» применяется отношение амплитуды ионизационного тока при заданном уровне ИИВ ( $I_{Ph}$ ) к току открытого транзистора ( $I_0$ ).

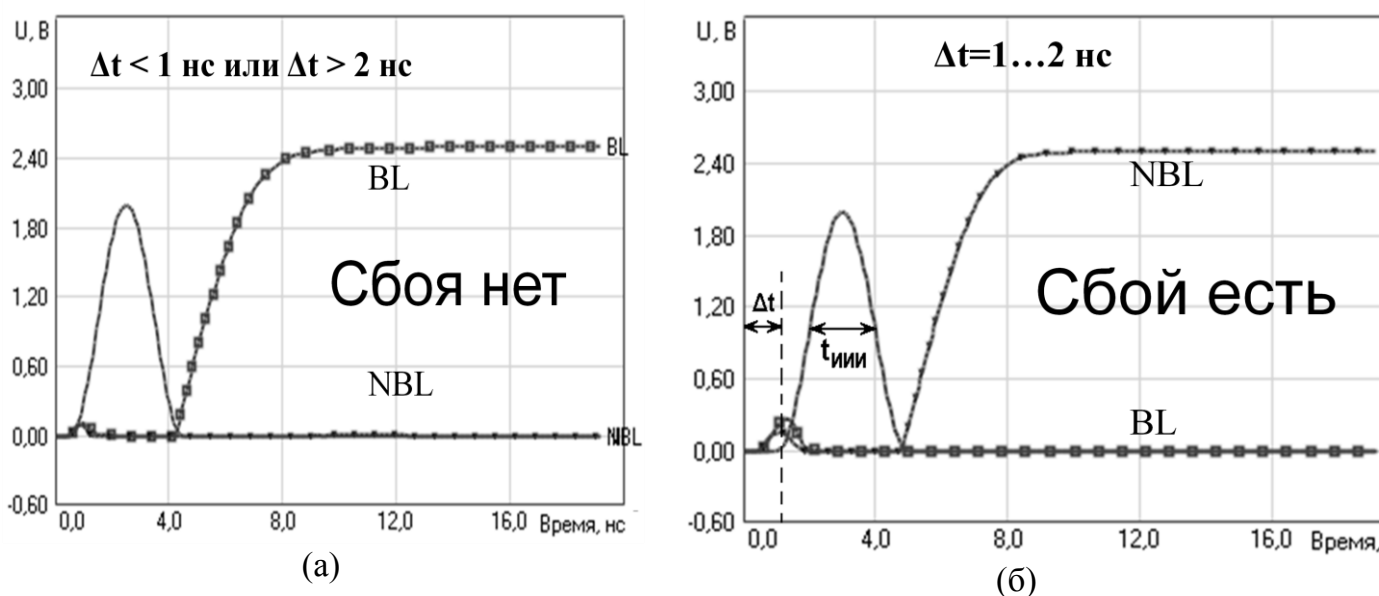


Рисунок 4 – Диаграммы сигналов BL и NBL при воздействии длительностью ИИВ 2 нс (измеренный на уровне 0,5) и интенсивностью, характерной для ионизационного тока, равного 20% от тока открытого МОП транзистора, в разные моменты времени (а), (б)

По итогам моделирования ЯП СЗУ установлено, что сбой возникает в промежутки времени, соответствующие началу работы усилителя считывания, пока регенерация данных не началась (рисунок 4). В остальные моменты времени сбои в накопителе не наблюдаются вплоть до предельных уровней воздействия, соответствующих уровням, при которых фототок сравнивается или превышает ток открытого транзистора (порядка  $10^{12}$  ед./с).

Характер дозовой деградации параметров СЗУ оказались сопоставимы с ОЗУ, выполненными по объемной КМОП технологии, однако необходимо отметить отсутствие эффекта стирания информации из накопителя, что потенциально позволяет использовать СЗУ для хранения критически важной информации. Выходные уровни и динамический ток потребления в процессе дозового воздействия изменялись слабо. Наиболее чувствительным параметром при воздействии является статический ток потребления в режиме хранения, рисунок 5.

Уровень стойкости СЗУ определяется выходом за критериальные значения статического тока потребления в режиме хранения (уровни стойкости порядка  $10 \cdot 10^3$  ед.) и функциональными отказами (уровни стойкости порядка  $30 \dots 50 \cdot 10^3$  ед.).

С целью выявления вклада в дозовый функциональный отказ накопителя и КМОП-периферии был проведен эксперимент по облучению кристалла СЗУ FM18L08, ф. Ramtron через отверстие в специально изготовленной свинцовой маске, рисунок 5.

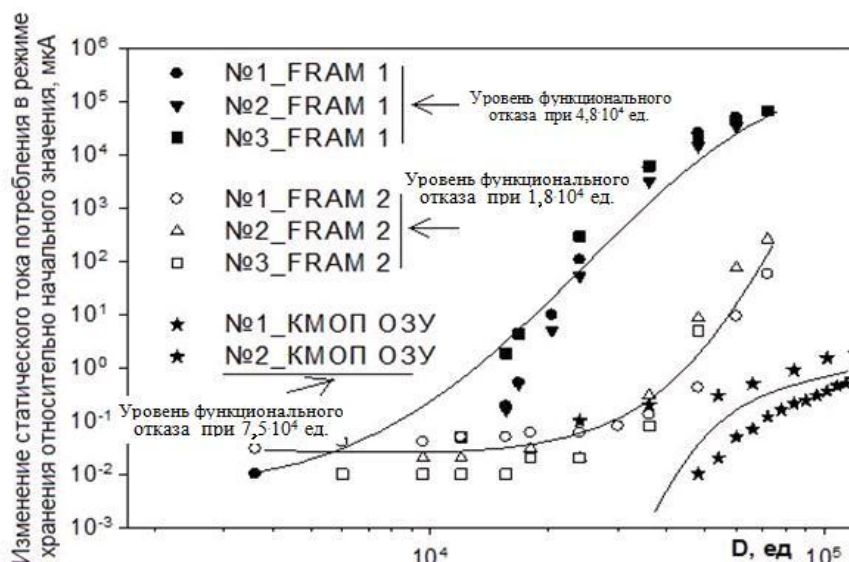


Рисунок 5 – Экспериментальные осциллограммы зависимости тока потребления в режиме хранения FM18L08-70-SG, ф. Ramtron (FRAM 1), MB85R256H, ф. Fujitsu Semiconductor (FRAM 2) и типового КМОП ОЗУ 256 К при стационарном воздействии. Среднее значение начального тока  $I_{ccs}$  составляет: для FRAM 1 – 3,4 мкА, для FRAM 2 – 0,4 мкА, для КМОП ОЗУ 256К – 10 мкА



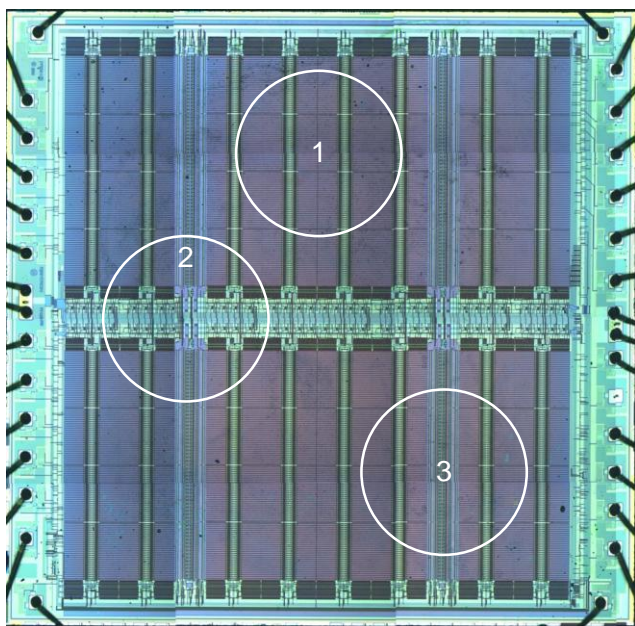


Рисунок 6 – Области облучения кристалла БИС СЗУ FM18L08:

- 1 – область накопителя;
- 2 – накопитель, усилитель считывания и селектор адресов
- 3 – накопитель и усилитель считывания

На разных образцах кристалла СЗУ FM18L08 облучались области 1, 2 и 3, определялись уровни дозового отказа всего кристалла, при этом контролировались все параметры СЗУ и регистрировалась информационная карта накопителя с учетом физической организации адресов.

На рисунке 6 представлены построенные с учетом физической адресации карты дозового отказа СЗУ FM18L08 при облучении областей 2 и 3 через диафрагму диаметром 2 мм. При облучении только области накопителя через отверстие 1 ошибок не наблюдается до уровня воздействия  $\geq 10^6$  ед.

Уровень стойкости СЗУ при облучении области 2 составил 70 Крад при тестировании алгоритмами Марш\_С и Маст+ и 80 Крад при тестировании алгоритмами длительностью 4N. До уровня воздействия 110 Крад ошибки наблюдались в строго локализованных областях, а после 120 Крад по всему накопителю (рисунок 7,б). Такой результат подтверждает наличие в области 2 схем дешифраторов строк и столбцов, деградация характеристик которых влияет на функционирование СЗУ. Уровень стойкости СЗУ при облучении области 3 составил 80 Крад, при уровне воздействия 90 Крад ошибки наблюдались как при тестировании алгоритмами длительностью 10N, так и 4N. Распределение ошибок по накопителю носило строго локализованный характер вплоть до уровня облучения 500 Крад с выходом на насыщение при уровне 270 Крад (рисунок 7,г). Поэтому можно заключить, что в области 3 облучению подвергались только ЯП и усилительные каскады.

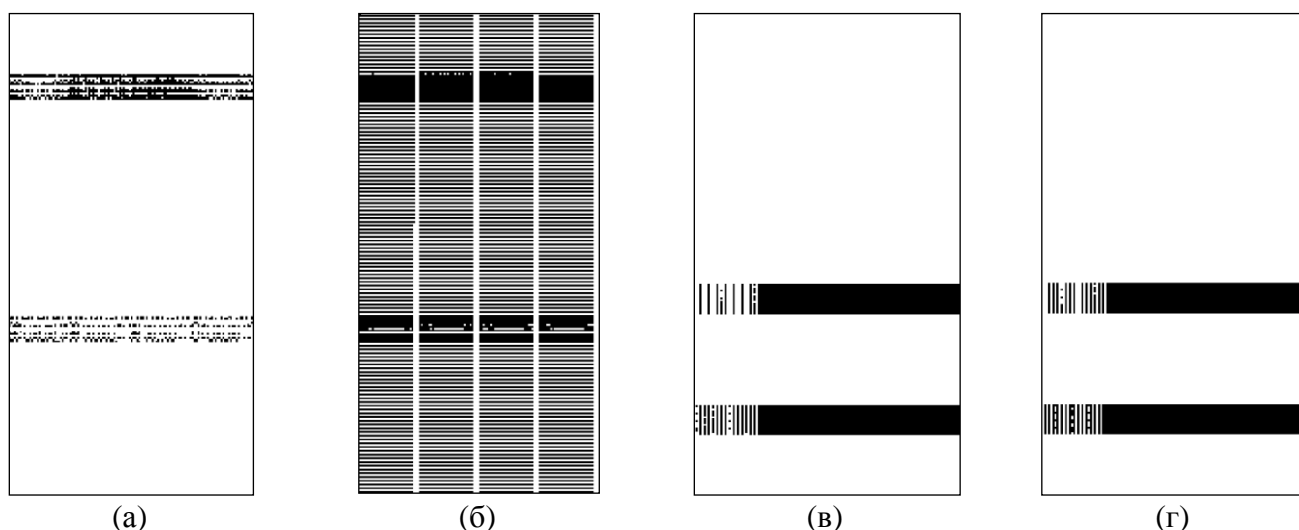


Рисунок 7 – Информационные карты полученных дозовых отказов БИС СЗУ FM18L08, ф. Ramtron, построенные с учетом физической адресации для разных уровней воздействия: (а) –  $110 \cdot 10^3$  ед., область 2; (б) –  $120 \cdot 10^3$  ед., область 2; (в) –  $270 \cdot 10^3$  ед., область 3; (г) –  $500 \cdot 10^3$  ед., область 3. Черные области – отказ

Таким образом, экспериментально подтверждено, что дозовая стойкость микросхем СЗУ определяется КМОП-периферией. Методика локального воздействия оказалась эффективной для определения стойкости СЗУ, а также определения наиболее чувствительных блоков.

Проведенный анализ показал, что специфика радиационной реакции ячейки СЗУ на воздействие импульсного рентгеновского излучения (ИРИ) с энергией 10-200 кэВ определяется несколькими группами доминирующих эффектов.

Первую группу составляют радиационно-термические эффекты, обусловленные нагревом элементов ячейки СЗУ (рисунок 8) при воздействии ИРИ. Величину максимально возможного нагрева пленки ЦТС можно оценить из соотношения:

$$\Delta T_{\max} \sim D/c, \quad (1)$$

где  $D$  – поглощенная доза,  $c$  – удельная теплоемкость ЦТС (350 Дж/кг·К).

Проведенный анализ показывает, что при флюенсе  $1 \text{ кал/см}^2$  нагрев сегнетоэлектрика составит  $\Delta T_{\max} \sim 70^\circ\text{C}$ , а платиновых электродов - до  $200^\circ\text{C}$ . При флюенсе энергии 2-3  $\text{кал/см}^2$  температура платиновых электродов может превысить температуру Кюри прилегающих слоев сегнетоэлектрика.

Вторую группу составляют термомеханические эффекты, обусловленные импульсным характером нагрева элементов ячейки СЗУ. Наличие в конструкции СЗУ материалов с большими атомными номерами (ЦТС, платина) приводит к неоднородному

энерговыведению в элементах схемы при ИРИ, неравномерному разогреву элементов ячейки и как следствие – возникновению механических напряжений, которые, в свою очередь, приводят к генерации импульсов напряжений на электродах конденсатора с сегнетоэлектрическим диэлектриком.

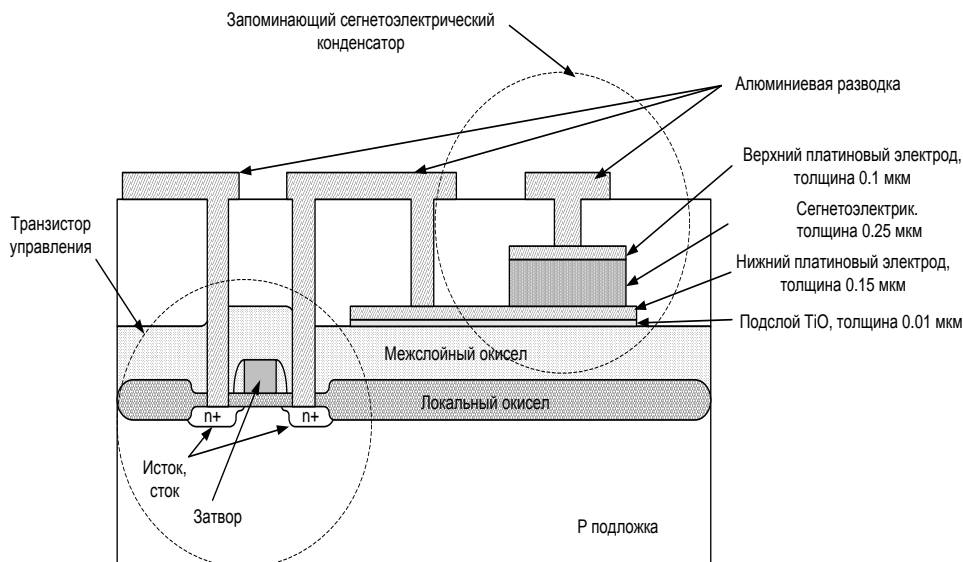


Рисунок 8 - Конструкции ячеек 1Т-1С СЗУ (планарная конструкция)

Амплитуду импульса напряжения  $\Delta U$  на обкладках сегнетоэлектрического конденсатора ЯП можно оценить из соотношения:

$$\Delta U \sim \frac{PS}{C} \sim \frac{d}{\epsilon_0 \epsilon} d_{33} \alpha E \Delta T_{\max}, \quad (2)$$

где  $P$  – модуль вектора поляризации,  $S$  – площадь обкладок,  $C$  – емкость конденсатора,  $\epsilon$  – максимальный компонент тензора диэлектрической проницаемости,  $\alpha$  – коэффициент линейного теплового расширения,  $E$  – модуль Юнга,  $d_{33}$  – характерное значение пьезоэлектрического коэффициента. Для указанных значений параметров при флюенсе ИРИ  $1 \text{ кал/см}^2$  амплитуда импульса напряжения на обкладках конденсатора ЯП СЗУ составляет  $\Delta U \sim 0,3 \text{ В}$ . Проведенный расчет с учетом геометрии ячейки (рисунок 8) согласуется с представленной оценкой.

Третья группа эффектов, специфических для воздействия ИРИ, обусловлена неравновесным характером энерговыведения из-за наличия в конструкции ячейки элементов с большими атомными номерами. При этом уровень поглощенной дозы в окрестности сегнетоэлектрического элемента памяти возрастает по сравнению с равновесным случаем («усиление дозы»).

Моделирование процессов энерговыведения в ячейке, представленной на рисунке 8,

показывает, что при воздействии ИРИ величина эффекта усиления дозы в области локализации управляющего МОП-транзистора составляет около 2 раз (рисунок 9).

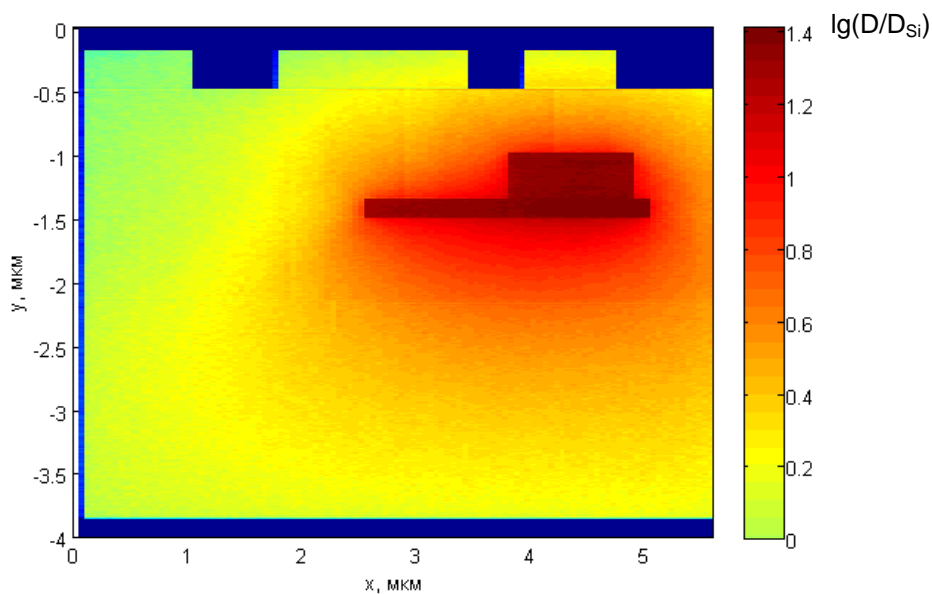


Рисунок 9 – Диаграмма усиления дозы в ячейке СЗУ

В работе показано, что при организации и проведении испытаний СЗУ на стойкость к ИРИ методически важно определить источник испытательного воздействия. В случае КМОП ИС испытания проводят с использованием эквивалентного гамма-излучения. Однако расчеты показывают, что при воздействии ИРИ уровень поглощенной дозы в сегнетоэлектрике более, чем на порядок превышает аналогичный показатель в кремниевой подложке (рисунок 10).

При проведении радиационных испытаний на гамма-установках уровни поглощенных доз в кремнии и ЦТС практически совпадают, что не позволяет оценить указанную особенность ИРИ. Более объективная оценка стойкости СЗУ к ИРИ может быть получена при проведении испытаний именно на рентгеновских источниках. Проведенные автором расчеты показали, что отличие поглощенной дозы рентгеновского излучения составляет около 3-х раз вместо 10-15 при воздействии гамма-излучения, что представлено на рисунке 10.

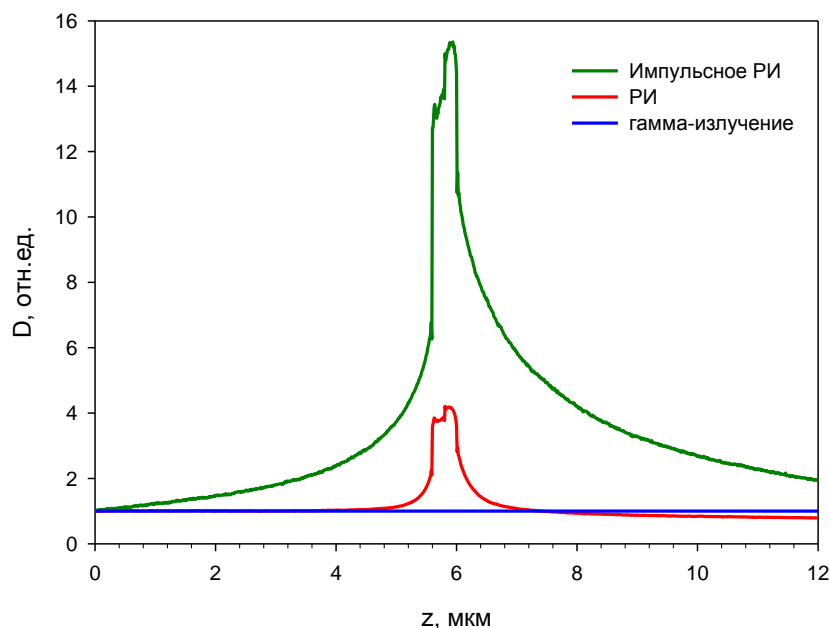


Рисунок 10 – Расчетный профиль распределения поглощенной дозы в модельной структуре Si (5 мкм) / Pt (0,05 мкм)/ ЦТС (0,15 мкм)/ Pt (0,2 мкм) /Si (5 мкм) при воздействии излучения тормозного спектра импульсного РИ, РИ (с максимальной энергией 45 кэВ) и гамма-излучения

### Методические и технические средства экспериментальных исследований СЗУ

Существующие методы радиационных исследований ЗУ подразумевают воздействие ИИ моделирующих установок на ИС в целом, при этом затруднено получение информации о радиационном поведении отдельных функциональных блоков СЗУ на условия функционирования узлов СЗУ.

Для исследования радиационной стойкости СЗУ необходимы такие средства, которые позволяли бы проводить исследования отдельно накопителя и «периферии»:

– **локальное радиационное воздействие на СЗУ по эффектам объемной ионизации.** Формирование области локального воздействия должно проводиться с помощью установки, формирующей сфокусированное лазерное импульсное излучение, путем введения «расфокусировки» (смещения поверхности кристалла из плоскости острой фокусировки). В этом случае диаметр области локального воздействия зависит от расстояния плоскости поверхности кристалла СЗУ до плоскости фокусировки с учетом эффективного угла расходимости пучка для используемого микрообъектива;

– **локальное радиационное воздействие на СЗУ по поверхностным радиационным эффектам.** Формирование области локального воздействия должно

проводиться с помощью выбора материала и толщины для металлической маски (свинцовая фольга толщиной 0,1...0,2 мм), формирующей форму области локального рентгеновского излучения, с учетом спектра рентгеновского излучения имитатора;

– **локальное радиационное воздействие на СЗУ для воспроизведения эффектов от отдельных ядерных частиц.** Воздействие на СЗУ с применением лазерного имитатора с импульсным расфокусированным (локальным) лазерным излучением позволяет, по сравнению со сфокусированным лазерным воздействием, снижать влияние металлизации и в десятки раз увеличивать производительность сканирования кристалла для определения наиболее чувствительных к одиночным эффектам областей.

Разработаны методики испытаний СЗУ на радиационную стойкость, обеспечивающие достоверный контроль их характеристик в процессе воздействия ИИ на основе рационального сочетания испытаний на моделирующих установках и имитаторах.

Возможность и высокая эффективность применения локального лазерного излучения для КМОП ОЗУ показана в работах Чумакова А.И., Яненко А.В., Печенкина А.А. Для периферийных схем СЗУ, построенных по КМОП технологии по тем же принципам, что и в КМОП СОЗУ, эти методы применимы. Импульсное локальное лазерное излучение вызывает ионизацию полупроводниковых структур накопителя СЗУ, подобную ионизации от тяжелых заряженных частиц, и может быть использовано для исследования локальных радиационных эффектов в области накопителя с известными ограничениями (влияние высокой плотности металлизации, отсутствие ионизации областей окисла), ряд из которых удается преодолеть, используя облучение сфокусированным импульсным лазерным излучением со стороны подложки.

Полученные экспериментальные данные (рисунок 11) подтверждают возможность использования импульсного сфокусированного и локального лазерного излучения для исследования локальных радиационных эффектов в СЗУ. В рассмотренных методах локальное радиационное воздействие подразумевает фрагментарное воздействие на области кристалла СЗУ, то есть пространственную локализацию воздействия.

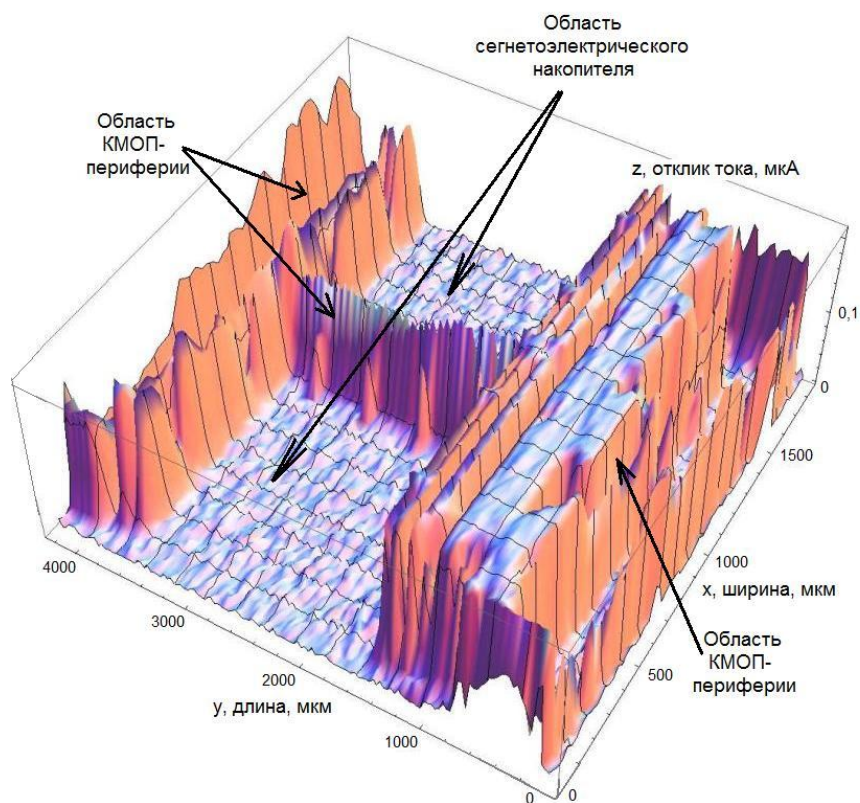


Рисунок 11 – Ионизационная реакция (сборание заряда в области сегнетоэлектрического накопителя) несмещенных р-п-переходов при воздействии сфокусированным лазерным излучением на СЗУ FM33256-G со встроенным микропрограммным управлением

### **Результаты экспериментальных исследований СЗУ на стойкость к воздействию отдельных ядерных частиц по одиночным эффектам**

Исследования СЗУ проводились с использованием ускорителей ионов и протонов, а также лазерных имитаторов локального радиационного воздействия. Исследования были направлены на получение параметров чувствительности по эффектам сбоя (одиночные и функциональные сбои, проявляющиеся как искажения или потеря информации) и по эффектам отказов (тиристорных эффектов при воздействии ОЯЧ).

Исследования показали, что некоторые СЗУ не свободны от тиристорного эффекта при воздействии ОЯЧ, что обусловлено применением КМОП элементов в периферии (рисунки 12, 13). Радиационное поведение СЗУ в части тиристорного эффекта является типовым за исключением отсутствия ТЭ в области накопителя, что типично для БИС памяти, произведенной по объемной КМОП технологии.



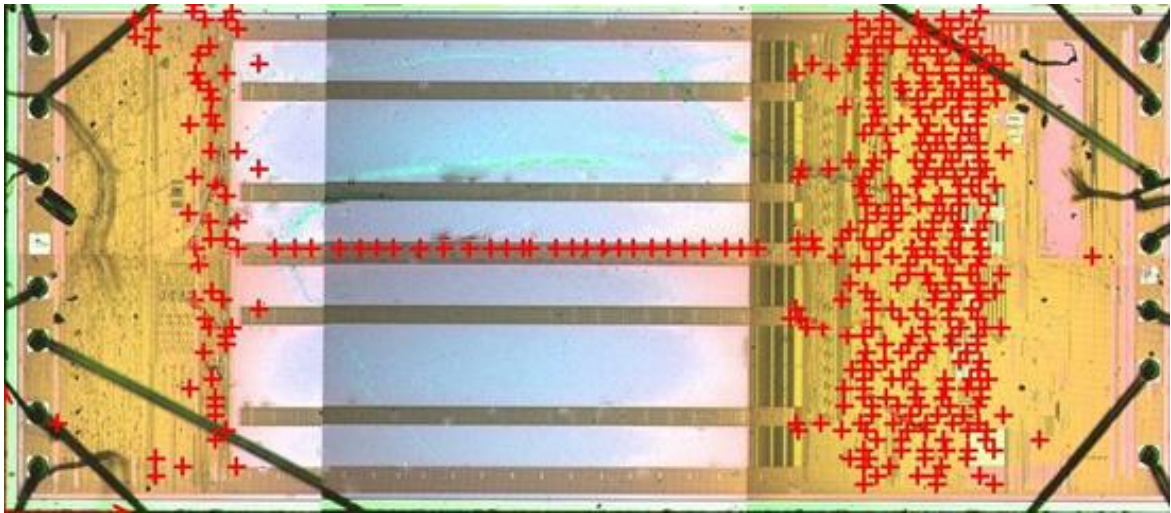


Рисунок 12 – Локализация областей возникновения тиристорных эффектов в СЗУ FM33256 обозначенных крестами, полученная на лазерном имитаторе «ПИКЛ-3» при воздействии на кристалл СЗУ с тыльной стороны лазерным излучением с диаметром 10 мкм и энергией 30 нДж

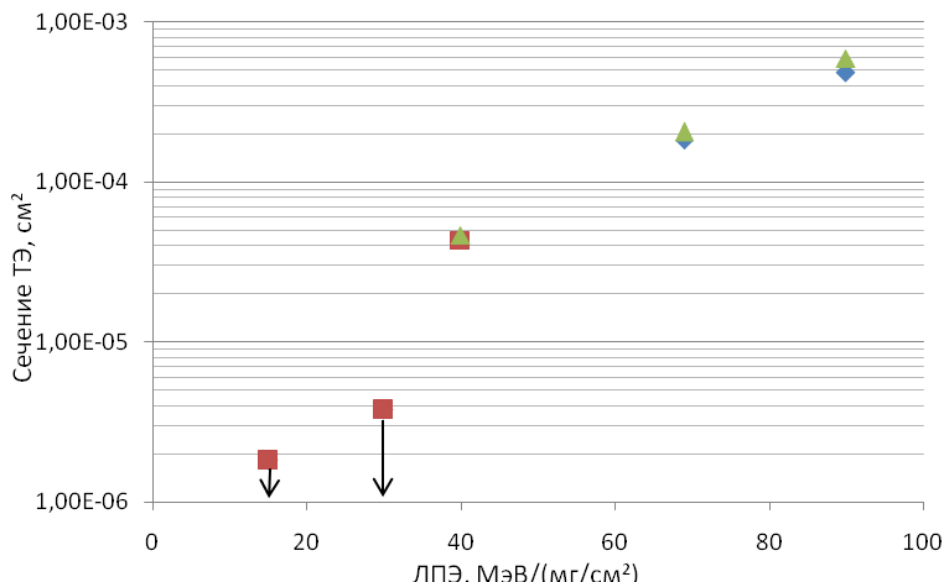


Рисунок 13 – Экспериментальная зависимость сечения тиристорных эффектов в СЗУ FM33256 при воздействии ионами с различными линейными потерями энергии (ЛПЭ)

Проявление локальных радиационных эффектов в части одиночных сбоев для СЗУ, напротив, сильно отличается от типичного и проявления в БИС памяти типа ОЗУ. Исследования показали, что в режиме хранения потери информации в накопителе при воздействии ОЯЧ не происходят. Но, несмотря на высокую стойкость самого накопителя СЗУ по одиночным эффектам, одиночные сбои в СЗУ наблюдаются в режиме циклической записи-считывания.



В ходе исследований обрабатывались предложенные автором алгоритмы функционального контроля для получения параметров чувствительности СЗУ в режимах записи и считывания. Проведенный анализ экспериментальных данных показал, что сбои в «периферии» могут приводить к потере информации сразу в нескольких ячейках или даже целых блоках накопителя данных. При этом наблюдается зависимость чувствительности СЗУ по эффектам сбоев от частоты обращения к СЗУ, что подтверждает возникновение сбоев в периферийных схемах СЗУ.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Основной научный результат диссертации заключается в следующем:

- подтверждено предположение, что радиационная стойкость современных СЗУ, вследствие объемных, поверхностных и локальных одиночных ионизационных эффектов в широком диапазоне уровней воздействия, определяется периферийными цепями и установлено экспериментально, что уровень радиационной стойкости СЗУ к ИИИ не выше, а к стационарному воздействию даже ниже, чем стойкость ОЗУ, выполненной по стандартной КМОП технологии. При воздействии ТЗЧ в СЗУ возникают сбои, по своему проявлению и последствиям существенно отличающиеся от сбоев в БИС памяти типа ОЗУ или ПЗУ (ФЛЭШ, ППЗУ и т.п.);

- установлено, что сбои сегнетоэлектрической ЯП при импульсном воздействии возникают в промежутке времени, соответствующем началу работы усилителя считывания, в остальные моменты времени сбои в ЯП СЗУ не наблюдаются вплоть до предельных уровней воздействия ИИВ;

- выявлены и исследованы особенности реакции накопителя СЗУ на воздействие импульсного рентгеновского излучения (ИРИ) с энергией в диапазоне 20...200 кэВ и выделены несколько групп процессов, наиболее существенным образом влияющих на импульсную реакцию сегнетоэлектриков: радиационно-термические, термомеханические и пьезоэлектрические, а также ионизационная проводимость диэлектрика;

- установлено, что при воздействии ИРИ до уровня флюенса порядка 1 кал/см<sup>2</sup>, не возникает значительных бросков напряжения, связанных с генерацией и распространением механических возмущений; определено, что при воздействии ИРИ может происходить радиационный нагрев платиновых обкладок и вещества ЦТС до температуры Кюри ( $T_K \sim 290^\circ\text{C}$ ) за счет существенно большего уровня поглощенной

дозы, при которой изменяется поляризация;

- показано, что уровень поглощенной дозы в сегнетоэлектрике при воздействии ИРИ превышает равновесное значение в кремнии более чем на порядок из-за неоднородного энерговыделения в элементах СЗУ при наличии в конструкции СЗУ материалов с большими атомными номерами (титанат-цирконат свинца, платина).

Основной практический результат работы заключается в следующем:

- развиты методики экспериментальных исследований СЗУ с учетом особенностей их внутренней архитектуры и доминирующих радиационных эффектов, которые позволяют в процессе экспериментальных исследований обнаружить места возникновения сбоев или отказов;

- получены результаты сравнительных экспериментальных исследований СЗУ зарубежных изготовителей позволят разработчикам изделий КТ при заданных требованиях по стойкости достоверно проводить анализ выполнения требований ТТЗ с применением СЗУ.

Таким образом, в ходе работы над диссертацией достигнута ее основная цель, а именно проведены исследования и получены результаты, направленные на повышение эффективности существующих и разработки новых научно обоснованных методических и технических средств прогнозирования и обеспечения радиационной стойкости по доминирующим радиационным эффектам ИИ элементов и функциональных узлов СЗУ, необходимых для комплектования изделий КТ.

## Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

1. Телец В.А., Негина Ю.С., Орлов А.А. Направления, базовые составляющие и условия развития изделий микросистемной техники специального назначения// Известия ВУЗОВ. Электроника.-2005.- №6.- С.9-20.

2. Орлов А.А., Уланова А.В., Боруздина А.Б. Обеспечение радиационной стойкости микросхем эргодонезависимых сегнетоэлектрических запоминающих устройств// Спецтехника и связь.- 2011.- №4-5.- С. 52-56.

3. Орлов А.А., Сокоян А.В., Герасимов В.Ф. Особенности поведения микросхем памяти на сегнетоэлектриках при воздействии импульсного рентгеновского излучения// Спецтехника и связь.- 2011.- №4-5.- С. 57-58.

4. А.С.Артамонов, Д.В.Бойченко, А.Ю.Никифоров, А.А. Орлов Рентгеновские имитационные методы: состояние и перспективы// Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость-2009».- 2009.- №12. - С.157-159.

5. Орлов А.А., Петров А.Г., Уланова А.В. Исследование характеристик сегнетоэлектрических ОЗУ (FRAM) 256 Кбит при воздействии ионизирующих излучений// Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость-2010». - №13. - С.25-26.

6. Орлов А.А. Вопросы применения ЭРИ иностранного производства при использовании в аппаратуре военной и космической техники с заданными требованиями по радиационной стойкости// Военная электроника и электротехника. - 2010.- С.209-216.

7. Артамонов А.С., Бойченко Д.В., Герасимов В.Ф., Демидов А.А., Егоров А.Н., Игнатов А.А., Калашников О.А., Киргизова А.В., Никифоров А.Ю., Орлов А.А., Скоробогатов П.К., Сокоян А.В., Телец В.А., Фигуров В.С., Чумаков А.И., Яненко А.В. **РД В 319.03.52-2004** Микросхемы интегральные и полупроводниковые приборы. Методы контроля радиационной стойкости на этапах разработки, производства и поставки. Общая методика лазерных имитационных испытаний в широком диапазоне уровней и длительностей импульсов специальных факторов, а также температуры среды.- 22 ЦНИИИ Минобороны России.- 2004.- С.27.

8. Бобровский Д.В., Васильев А.Л., Герасимов В.Ф., Криницкий А.В., Малинин В.Г., Никифоров А.Ю., Орлов А.А., Печенкин А.А. Телец В.А., Улимов В.Н., Чумаков А.И., Яненко А.В. **РД В 319.03.58-2010** Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Методы испытаний и оценки стойкости интегральных схем и мощных МДП-транзисторов по эффектам отказов от воздействия отдельных высокоэнергетических тяжелых заряженных частиц и протонов космического пространства.- 22 ЦНИИИ Минобороны России.-2010.- С.44.