

На правах рукописи

Экз. №

ДАВЫДОВ ГЕОРГИЙ ГЕОРГИЕВИЧ

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЗОВЫХ ЭФФЕКТОВ
В ЦИФРОВЫХ КМОП МИКРОСХЕМАХ
НА СТРУКТУРАХ «КРЕМНИЙ-НА-САПФИРЕ»
ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ИОНИЗИРУЮЩЕМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

05.13.05 - Элементы и устройства вычислительной техники
и систем управления

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:



Москва – 2009 г.

Работа выполнена в Московском инженерно-физическом институте (государственном университете).

Научный руководитель Доктор технических наук, профессор
 Никифоров Александр Юрьевич

Официальные оппоненты: Доктор технических наук
 Гонтарь Вадим Васильевич
 Кандидат технических наук
 Вавилов Владимир Алексеевич

Ведущая организация: ФГУ «22 ЦНИИИ Минобороны России»

Защита состоится 20 апреля 2009 г. в 15 час. 00 мин.

На заседании диссертационного совета Д212.130.02

в Московском инженерно-физическом институте (государственном университете)

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ

Автореферат разослан марта 2009 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 научно-технической задачи развития расчетно-экспериментальных методов и технических средств прогнозирования дозовых отказов Комплементарных Метал-Оксид-Полупроводник (КМОП) больших интегральных схем (БИС) на структурах «кремний на сапфире» (КНС) при импульсном ионизирующем воздействии (ИИВ) с характеристиками, недостижимыми в лабораторных условиях. Прогнозирование дозовых отказов КМОП КНС БИС при импульсном воздействии имеет существенное значение при создании радиационно-стойких элементов и устройств систем управления и вычислительной техники военного, космического и другого специального назначения, повышения их функциональных и эксплуатационных характеристик, а также эффективности применения.

Актуальность темы диссертации обусловлена необходимостью разработки и развития эффективных методов расчетно-экспериментального прогнозирования уровня дозовой стойкости КМОП КНС БИС в условиях запрета натуральных облучательных опытов и ограниченных возможностей испытательных моделирующих установок (МУ).

Заданные требования к электронной компонентной базе систем управления и вычислительной техники специального назначения (военной, ракетно-космической техники, систем связи, аппаратуры физического эксперимента) по стойкости к ИИВ до $10^{12} \dots 10^{13}$ ед/с являются практически недостижимыми для БИС на объемных кремниевых структурах. Одним из методов обеспечения высокого уровня радиационной стойкости является реализация таких БИС на структурах с диэлектрической изоляцией элементов, обеспечивающих существенное снижение ионизационных токов и подавление паразитных связей между соседними элементами БИС при ИИВ. Исторически первой и до настоящего времени практически единственной промышленно-освоенной отечественной технологией с диэлектрической изоляцией элементов является КНС технология. КМОП КНС БИС реально обеспечивают предельные уровни «выживания» и сбоеустойчивости при ИИВ по эффектам мощности дозы. Однако наличие «нижней» дополнительной (по сравнению с объемными КМОП-структурами) границы подзатворной кремниевой области и диэлектрической подложки в активных МОП-транзисторах (МОПТ) определяет повышенную чувствительность КМОП КНС микросхем к дозовым эффектам как при стационарных, так и при импульсных радиационных воздействиях. При этом в соответствии со сложившейся инженерной практикой дозовые испытания микросхем проводятся лишь при стационарных (Сo-60 или рентген) или периодических (ускоритель электронов) испытательных воздействиях, а их результаты распространяются и на мощные импульсные воздействия.

На решение задачи прогнозирования уровня дозовой стойкости КМОП КНС БИС при импульсных воздействиях на основе создания и развития методов и средств расчетно-экспериментального моделирования дозовых эффектов в цифровых КМОП КНС БИС и направлена диссертация.

Важность и актуальность темы диссертации отражена в «Основах политики Российской Федерации в области развития электронной компонентной базы на период до 2010 года и дальнейшую перспективу», утвержденных Президентом Российской Федерации 12.04.02, в соответствии с которыми создание радиационно-стойкой ЭКБ при ее разработке, производстве и применении в стратегически значимых системах отнесено к одной из приоритетных задач.

Состояние исследований по проблеме

Вопросам создания и развития номенклатуры микросхем на КНС структурах посвящены многочисленные научные исследования и разработки, выполненные к.ф.-м.н. Поляковым И.В., д.т.н. Адониным А.С. (ОАО «НПП «Сапфир»), к.т.н. Машевичем П.Р., Романовым А.А. (ОАО «Ангстрем»), к.т.н. Герасимовым Ю.М., к.т.н. Григорьевым Н.Г. (МИФИ), д.т.н. Антимировым В.М., Малковым В.И. (ФГУП «НПО Автоматики») и др. Физические модели, методики и первые результаты имитационных испытаний КМОП КНС БИС были развиты в работах д.т.н. Никифорова А.Ю., д.т.н. Скоробогатова П.К., к.т.н. Согаяна А.В. (МИФИ), электрические модели – в трудах д.т.н. Петросянца К.А., к.т.н. Харитоновой И.А. (МИЭМ) и др. Методические и технические средства тестирования БИС в процессе радиационного эксперимента предложены д.т.н. Чумаковым А.И., к.т.н. Барбашовым В.М. и др. Вопросам прогнозирования эффектов мощности дозы и обеспечения сбоеустойчивости КМОП КНС БИС запоминающих устройств при ИИВ с предельными уровнями посвящена диссертация к.т.н. Киргизовой А.В.

Однако до сих пор остаются недостаточно проработанными важные вопросы моделирования и прогнозирования радиационного поведения КМОП КНС БИС при импульсных дозовых воздействиях. Практически во всех работах эффекты дозы и мощности дозы ИИВ рассматривались независимо и без учета их взаимного влияния. В практике радиационных испытаний в соответствии с ГОСТ РВ 20 57.415 принято проводить отдельную оценку стойкости микросхем по двум указанным группам эффектов. Поэтому специфика импульсного характера набора дозы в КМОП КНС БИС при ИИВ практически не исследована. Соответственно, не обоснован рациональный выбор источников воздействий для дозовых испытаний КМОП КНС БИС, не проанализирована корректность использования для этого рентгеновских имитаторов. На момент начала работы средства радиационного эксперимента не обеспечивали полноценного управления и контроля функционирования КМОП КНС БИС в активных динамических режимах работы в реальном времени во время и после ИИВ.

Известная методика снижения засоренности производственных партий КМОП БИС нестойкими микросхемами на основе радиационно-термической обработки в пассивном режиме оказалась неэффективной в отношении КМОП КНС технологии.

Таким образом, диссертация направлена на разрешение научного противоречия, которое заключается одновременно в необходимости и невозможности обеспечить достовер-

ное прогнозирование дозовых эффектов в цифровых КМОП КНС микросхемах при ИИВ, оставаясь в рамках имеющихся методов и средств теоретического и экспериментального моделирования без их научно-технического развития.

Целью диссертации является развитие научных методов и разработка методических и технических средств прогнозирования дозовых эффектов в цифровых КМОП КНС БИС при импульсном ионизирующем воздействии с учетом характеристик ИИВ, а также режимов и условий работы микросхем в аппаратуре.

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

- выявления, теоретического анализа, моделирования и экспериментальных исследований основных закономерностей радиационного поведения и доминирующих радиационных эффектов в КМОП КНС БИС и их элементах при стационарных и импульсных дозовых воздействиях;

- развития модели и основанного на ней расчетно-экспериментального моделирования дозовых эффектов в КМОП КНС БИС при импульсном характере набора дозы, обеспечивающей достоверность прогноза уровня стойкости при минимизации объема радиационных испытаний и затрат на их проведение;

- научно-обоснованного выбора источников дозовых воздействий и обоснованием возможности и границ применения рентгеновских имитаторов для испытаний КНС БИС;

- разработки новых и совершенствования существующих методических и технических средств испытаний КМОП КНС БИС на стойкость к дозовому воздействию, обеспечивающих гибкое управление, выявление и диагностирование параметров дозовой стойкости в реальном времени в процессе и после воздействия;

- получения и систематизации оригинальных экспериментальных данных, устанавливающих общность радиационного поведения КМОП КНС БИС в широких диапазонах режимов работы и условий эксплуатации – электрического режима работы, уровней дозовых воздействий (до группы 6Ус ГОСТ РВ 20.39.414.2) и сроков эксплуатации;

- разработки и внедрения методики неразрушающего контроля и прогнозирования дозовой стойкости КМОП КНС микросхем с учетом импульсного характера воздействия и адаптированной для различных вариантов конструктивного исполнения микросхем;

- исследования влияния схемно-технологической реализации на дозовую стойкость КМОП КНС БИС, разработки научно-обоснованных рекомендаций по повышению радиационной стойкости, анализа дозовой стойкости КМОП БИС при переходе с КНС на более перспективную КНИ технологию.

Научная новизна работы:

1. Предложена оригинальная численная модель дозового отклика КНС МОП-транзисторов и цифровых КМОП КНС БИС на их основе при импульсном характере набора дозы. Модель описывает релаксацию радиационно-индуцированного заряда (РИЗ) в приграничной области кремния с сапфировой подложкой после ИИВ; при этом учитывает-

ся распределение зарядовых состояний вблизи границы, электрический режим работы активного элемента, а также амплитудно-временные параметры воздействия.

2. Предложена методика прогнозирования уровня дозовой стойкости КМОП КНС БИС при импульсном воздействии с предельными уровнями, недостижимыми в лабораторных условиях, по результатам экспериментов с использованием доступных стационарных и импульсных источников ИИ. Полученные в ходе лабораторных испытаний данные экстраполируются в область требуемых параметров воздействия по результатам минимального (до 5% от общего объема испытаний) объема импульсных испытаний с приемлемой интенсивностью, проведенных для малой выборки КНС БИС.

3. Предложено использовать метод радиационно-стимулированного отжига для восстановления первоначального значения статического тока потребления КМОП КНС БИС. Научно обоснован методический подход к неразрушающему контролю дозовой стойкости КМОП КНС БИС по критическому параметру – току потребления в статическом режиме. Выбраны, научно-обоснованы и экспериментально подтверждены режимы облучения и отжига, обеспечивающие высокую достоверность прогноза и его неразрушающий характер. Оформлена заявка на изобретение, приоритет №2007146805 от 17.12.07.

Практическая значимость работы:

1. Предложена оригинальная методика, позволяющая прогнозировать отказ образца КМОП КНС БИС при заданном уровне дозового воздействия большой интенсивности по результатам контрольного лабораторного облучения этого образца ИИВ средней интенсивности и последующего отжига.

2. Разработана оригинальная методика неразрушающего контроля и прогнозирования дозовой стойкости КМОП КНС БИС по критическому параметру – току потребления в статическом режиме. Разработаны и развиты методические и технические средства неразрушающего контроля производственных партий КМОП КНС БИС по стойкости к дозовым воздействиям с учетом импульсного характера набора дозы и различных видов конструктивной реализации микросхем (на полиимидных носителях, на пластинах и в металлокерамических корпусах).

3. Получены оригинальные результаты экспериментальных исследований радиационного поведения для практически всех типов отечественных цифровых КМОП КНС БИС, созданных в последнее десятилетие на различных предприятиях (ОАО «Ангстрем», ОАО «НПП Сапфир», ФГУП «ФНПЦ НИИИС»). Результаты позволили верифицировать разработанные модельные представления и методические подходы, обосновать взаимную сходимость и адекватность различных видов испытаний и предложить рациональный состав дозовых испытаний, обеспечивающий сочетание высокой достоверности и технико-экономической эффективности.

4. Разработаны рекомендации по увеличению дозовой стойкости КМОП КНС БИС на основе рационального выбора их конструкции, топологии, а также параметров техпроцес-

са: оптимальное соотношение стойкости и стабильности функционирования может быть достигнуто при толщине приборного слоя КНС структуры 0,3...0,4 мкм; введение дополнительных проводящих слоев приводит к снижению тока потребления КНС БИС; повышение уровня стойкости КНС БИС обеспечивается при установленных оптимальных значениях энергии имплантации бора и дозы имплантации.

5. Впервые установлено снижение максимальной величины радиационно-индуцированных токовых утечек в КМОП КНС БИС при эксплуатации или хранении микросхем в течение длительного времени. Впервые показано повышение уровня дозовой стойкости КМОП КНС БИС в процессе длительной эксплуатации или хранения.

Впервые получены результаты исследований радиационного поведения СВЧ КНС БИС иностранного производства с ультратонким (0,1 мкм) приборным слоем $UTSi^{\circledR}$. Установлена близость основных закономерностей поведения иностранных и отечественных КНС БИС. Полученные результаты определяют потенциальную возможность использования предложенных методик для прогнозирования дозовой стойкости КНС БИС, изготовленных по технологии $UTSi^{\circledR}$.

Впервые получены оригинальные результаты сравнительных исследований дозовых эффектов в КМОП БИС, выполненных по технологиям КНС и «кремний на изоляторе» (КНИ), показывающие близость основных закономерностей их радиационного поведения. Полученные результаты определяют потенциальную возможность использования предложенных методик для прогнозирования дозовой стойкости КНИ БИС и СБИС.

Результаты, выносимые на защиту

1. Модель релаксации РИЗ после дозового воздействия, учитывающая импульсный характер набора дозы, профиль распределения РИЗ вблизи границы приборного слоя и сапфировой подложки и электрический режим КНС структуры, и позволяющая прогнозировать ток потребления КНС БИС в произвольный момент времени после ИИВ.

2. Методика прогнозирования отказа образца КМОП КНС БИС при заданном уровне дозового воздействия большой интенсивности по результатам контрольного лабораторного облучения этого образца ИИВ средней интенсивности и последующего отжига.

3. Обобщенная методика 100%-го неразрушающего контроля КМОП КНС БИС по стойкости к дозовым воздействиям, позволяющая проводить разбраковку партий КМОП КНС БИС по дозовой стойкости, минимизировать засоренность производственной партии потенциально нестойкими образцами и исключить их применение в ответственной аппаратуре.

4. Аппаратно-программный комплекс для радиационных испытаний КНС БИС, обеспечивающий гибкое управление, а также полноценный функциональный и параметрический контроль работоспособности БИС в реальном времени, в активных динамических режимах работы в процессе и после ионизирующего воздействия. Предложены меры, по-

вышающие помехозащищенность сигнальных линий при проведении эксперимента на моделирующей установке.

5. Оригинальные результаты экспериментальных исследований радиационного поведения цифровых КМОП КНС БИС и тестовых структур с различными топологическими размерами, параметрами техпроцесса, в различных режимах и сроках эксплуатации, подтверждающие обоснованность предложенных методических и технических средств прогнозирования дозовой деградации параметров КНС БИС при импульсном ионизирующем воздействии.

Апробация работы

Результаты диссертации внедрены в ОАО «НПП Сапфир», ОАО «Ангстрем» и ФГУП «ФНПЦ НИИИС» при разработке и радиационных испытаниях большинства отечественных КМОП КНС БИС серий 1825, 1620, 5511. Результаты диссертации вошли в отчетные материалы по многочисленным НИР и ОКР («Врач», «Микроскоп», «Стек», «Мурена», «Корвет», «Сапфир», «Мелисса», «Микология» и др.), выполняемых по заказам Минобороны РФ, Минпромторга, Роскосмоса, Госкорпорации «Росатом» и предприятий оборонного комплекса. Полученные в диссертации результаты реализованы в Нормативных документах Минобороны России (ОСТ В 11.073.013 часть 10), а также в более чем 25 программах-методиках и протоколах испытаний КМОП КНС БИС, согласованных с ФГУ «22 ЦНИИИ Минобороны России» в рамках Государственной Программы Вооружений.

Основные результаты диссертации докладывались на российских научных конференциях “Радиационная стойкость электронных систем” (Лыткарино, 2004-2008 гг.); научных сессиях МИФИ (Москва, 2005-2008 гг.); на научных конференциях “Электроника, микро- и нанoeлектроника” (г.Кострома 2003 г., г.Н.Новгород 2004 г., г.Вологда 2005 г., г.Гатчина 2006 г.); на IV, V, VI и VII научно-практических семинарах «Проблемы создания специализированных радиационно-стойких СБИС на основе гетероструктур» (г.Н.Новгород, 2004, 2005, 2006, 2007 гг.).

Публикации: Основные результаты диссертации опубликованы в 15 работах (в период с 2004 по 2008 гг.), в том числе 2 – в реферируемых журналах и 1 - без соавторов.

Объем и структура диссертации. Диссертация содержит 152 страниц, в том числе 102 рисунка, 14 таблиц, список литературы из 119 наименований и состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

Содержание диссертации

Первая глава посвящена анализу проблемной ситуации в области развития БИС на КНС структурах для радиационно-стойких систем; в ней описываются особенности применения КНС БИС в аппаратуре, радиационные эффекты в КНС БИС и существующие методы их моделирования, выявлены тенденции развития технологии с диэлектрической изоляцией элементов, обоснована постановка задач исследований.

Вторая глава содержит анализ доминирующих механизмов дозовой деградации параметров КМОП КНС БИС, модель релаксации РИЗ после ИИВ, методику прогнозирования дозового отклика при ИИВ большой интенсивности по результатам лабораторного облучения с меньшей интенсивностью, а также методику прогнозирования параметров БИС при поглощении большого уровня дозы по результатам облучения малой тестовой дозой.

Третья глава содержит описание общей методики исследований стойкости КМОП КНС БИС, обоснование адекватности применения имитаторов в качестве источников ионизирующего воздействия, а также описание аппаратно-программного комплекса радиационного эксперимента, адаптированного для различных источников импульсного и стационарного дозовых воздействий.

В **четвертой главе** описывается и обосновывается методика неразрушающего контроля дозовой стойкости производственных партий КМОП КНС БИС, проводится статистическая оценка ее эффективности, описывается адаптация методики для различного конструктивного исполнения БИС, определяются границы применимости.

Пятая глава посвящена исследованиям дозовой стойкости номенклатуры КНС БИС, разработке рекомендаций по оптимизации параметров технологического процесса изготовления КНС БИС (изменение толщины приборного слоя, уровня и дозы легирования областей стоков-истоков, введение шунтирующих слоев) для обеспечения дозовой стойкости; представлены результаты сравнительных исследований КНС и КНИ БИС, изготовленных по эквивалентным шаблонам; рассмотрены эффекты деградации дозовой стойкости при длительной наработке и хранении КНС БИС.

Анализ проблемной ситуации в области развития БИС на КНС структурах для радиационно-стойких систем

В результате анализа литературных источников и результатов исследований отечественных КМОП КНС БИС установлено, что при средних уровнях поглощенной дозы доминирующим эффектом является накопление радиационно-индуцированного заряда в области вблизи границы приборного слоя и сапфира подложки, обуславливающее рост токовых утечек n-канальных МОПТ, дающих основной вклад в величину тока потребления БИС в статическом режиме I_{CC} . Параметрические отказы по другим критериям, а также нарушение функционирования наблюдаются при больших (на 2...3 порядка) уровнях воздействия.

Высокий уровень дефектности приграничной области обусловлен особенностями современных отечественных техпроцессов производства КНС структур и микросхем на их основе. Данное обстоятельство, а также случайный характер распределения дефектов по пластине обуславливают значительный разброс радиационно-индуцированных утечек КНС БИС даже с одной пластины (рис. 1). Показано, что известный метод радиационно-термической обработки (РТО) не обеспечивают значимого снижения разброса утечек.

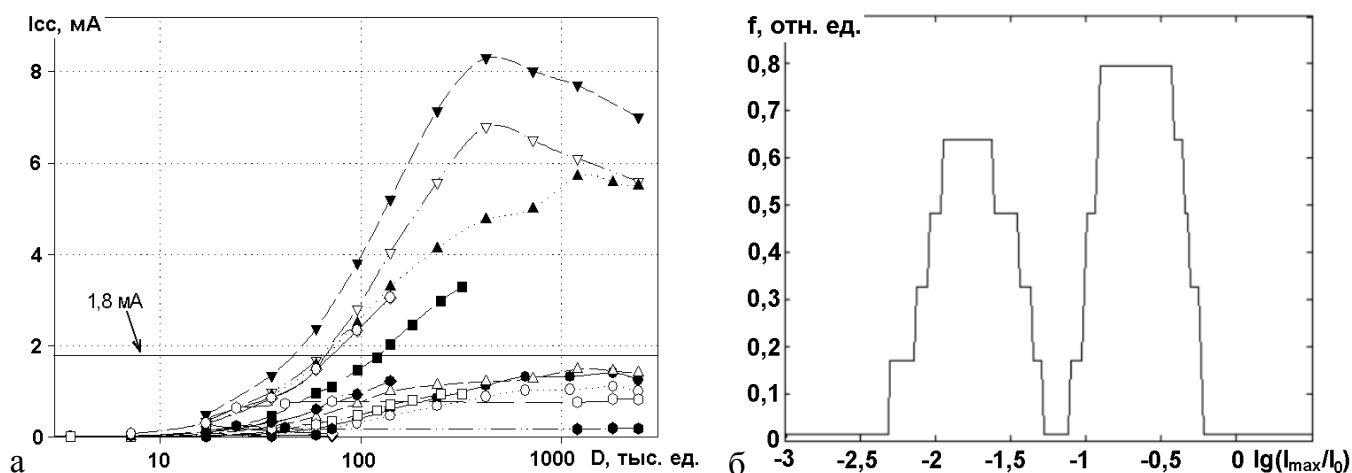


Рис. 1. Типичные дозовые зависимости I_{CC} (а) и нормированная плотность распределения максимального значения I_{CC} (б) группы КНС БИС

Проведенный анализ литературы показал отсутствие к началу диссертационной работы единого подхода к оценке дозовой деградации критериальных параметров КМОП КНС БИС при импульсном воздействии, а также адекватных моделей и методик оценки дозового отклика КНС БИС при ИИВ.

Обобщенный анализ проблемной ситуации показал невозможность решения поставленных задач с помощью существующих на момент начала работы средств радиационного эксперимента и радиационного моделирования КНС БИС без их развития, и подтвердил необходимость и актуальность темы и цели диссертации.

Расчетно-экспериментальное моделирование дозовых ионизационных эффектов в КНС БИС с учетом импульсного характера набора дозы

Дозовая зависимость статического тока потребления КНС БИС имеет возрастающий насыщающийся характер, который может быть обусловлен заполнением всех ловушек дырок на границе $\text{Si}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (1), ограничением притока новых дырок к границе полем захваченного положительного заряда (2) или достижением динамического равновесия между захватом дырок на ловушки и их рекомбинацией с радиационно-генерируемыми электронами в сапфире (3). Проведенные исследования показали, что насыщение тока потребления не связано с исчерпанием свободных ловушек дырок по механизму 1, а определяется процессами 2 и 3, существенно зависящими от величины внешнего поля.

Установлено, что зависимость тока утечки КНС МОПТ от потенциала сапфировой подложки существенно нелинейна и имеет «подпороговый» и «надпороговый» участки. При этом встраивающийся заряд создает собственное поле, направленное противоположно внешнему и влияющее на дальнейшие темпы его встраивания. Показана зависимость темпов встраивания РИЗ от электрического режима работы активного МОПТ. Ток утечки линейно зависит от приложенного смещения и принимает первоначальное значение при нулевом смещении (рис. 2).

Амплитуда отклика КНС структуры при ИИВ линейно зависит от приложенной разности потенциалов, что указывает на омический характер проводимости сапфира и согласуется с выводами о малых (порядка 1 нс) временах жизни носителей. Характер релаксации РИЗ обусловлен медленными процессами перезаряда дефектов на границе Si/Al₂O₃.

Релаксация РИЗ независимо от интенсивности и уровня воздействия (при условии $t_{возд} \ll t_{изм}$) имеет в области больших времен характер, близкий к логарифмическому. В области малых времен (до ~с) зависимость имеет более сложный характер (рис. 3а). Это обстоятельство затрудняет прямую экстраполяцию результатов, полученных при воздействии малой и средней интенсивности, в область малых времен.

Экстраполяция временных зависимостей релаксации тока потребления в области больших времен (рис. 3б) показывает сходимость кинетик при $t \sim 10^9$ с. Такое поведение тока потребления как характеристики встроенного заряда аналогично наблюдаемому в традиционной структуре Si/SiO₂.

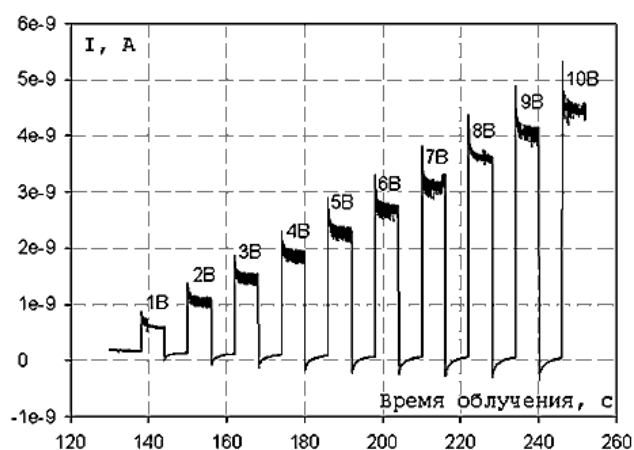


Рис. 2. Зависимости токовой утечки при изменяющемся смещении

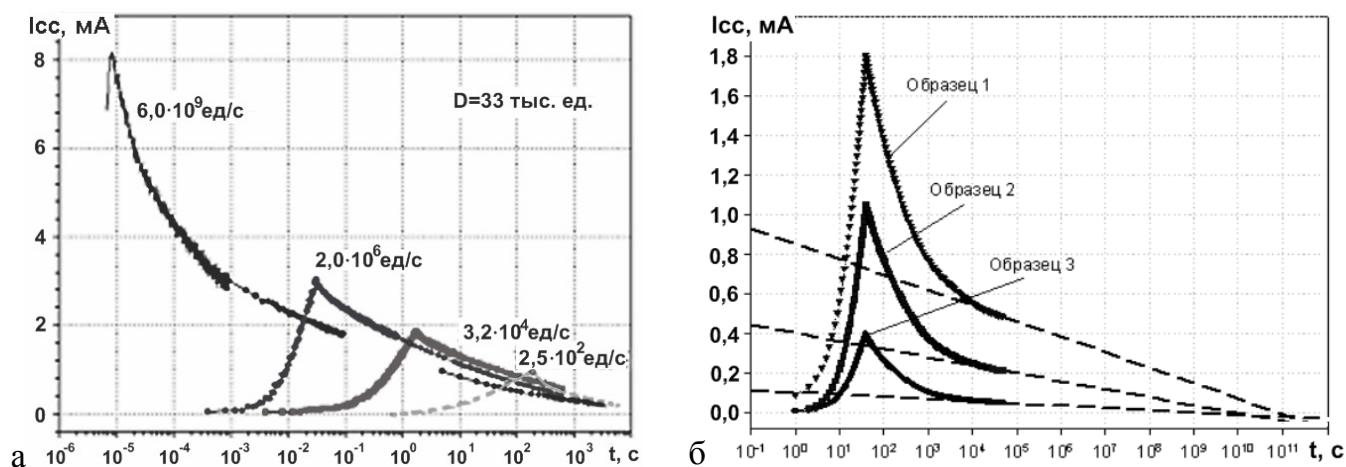


Рис. 3. Временные зависимости импульсного тока (релаксация РИЗ) при воздействии импульсов ускорителя электронов «Электроника-003» и рентгеновского имитатора РЕИМ-2 (а) и логарифмическая экстраполяция зависимостей в область больших времен (б).

Численная модель релаксации РИЗ

Из полученных результатов экспериментов следует, что моделирование процессов формирования РИЗ при облучении необходимо проводить с учетом влияния поля захваченного положительного заряда.

Процессы переноса носителей в сапфировой подложке и релаксации заряда, захваченного на ловушки границы раздела кремний-сапфир, предполагаются влияющими только на величину тока потребления КНС БИС. Характерные времена переноса в сапфире

можно считать существенно меньшими, чем возможное время потери работоспособности (ВПР), обусловленное релаксацией заряда на приграничных ловушках. Радиационно-индуцированный ток в сапфире в первом приближении прямо пропорционален напряженности внешнего поля и мощности дозы. Распределение ловушек дырок, эффективно влияющих на формирование канала проводимости, имеет близкий к экспоненциальному характер: $N(x) \propto N_s e^{-x/b} / b$, где N_s – приведенная поверхностная плотность ловушек, b - параметр распределения, имеющий размерность расстояния.

В этом случае уравнение баланса РИЗ после ИИВ выглядит как

$$\frac{\partial p_t}{\partial t} \approx \sigma_p F_{p0} N - (\sigma_p F_{p0} + \sigma_n F_{n0} + \nu + \sigma_p F_{p0} Na / E_0) p_t. \quad (1)$$

С учетом допущений решение уравнения (1) для случая импульсного воздействия ИИ с интенсивностью P и длительностью импульса t_r при временах $t \gg t_r$ можно представить

в виде
$$p_t \approx \frac{N_s}{1 + \frac{N_s a}{b E_0} + \frac{\sigma_n F_{n0}}{\sigma_p F_{p0}}} (1 - e^{-BD}) \varphi \left(v_0 e^{\frac{W}{kT} t} \right) \propto p_t(t_r) \varphi \left(v_0 e^{\frac{W}{kT} t} \right), \quad (2)$$

$$B = [\sigma_p F_{p0} + \sigma_n F_{n0} + \sigma_p F_{p0} Na / E] / P,$$

$$\varphi(x) = \frac{1}{(1+x)^\xi}, \quad \xi \equiv \frac{\lambda}{b}.$$

В области больших времен решение (2) приобретает вид $p_t \propto At^{-\xi}$.

Зависимость (2) позволяет в первом приближении описать релаксацию тока потребления исследованных КНС БИС (рис. 4). Вместе с тем, из полученных результатов видно, что по мере повышения тестовой мощности дозы ошибка прогноза, построенного на основании выражения (2), уменьшается.

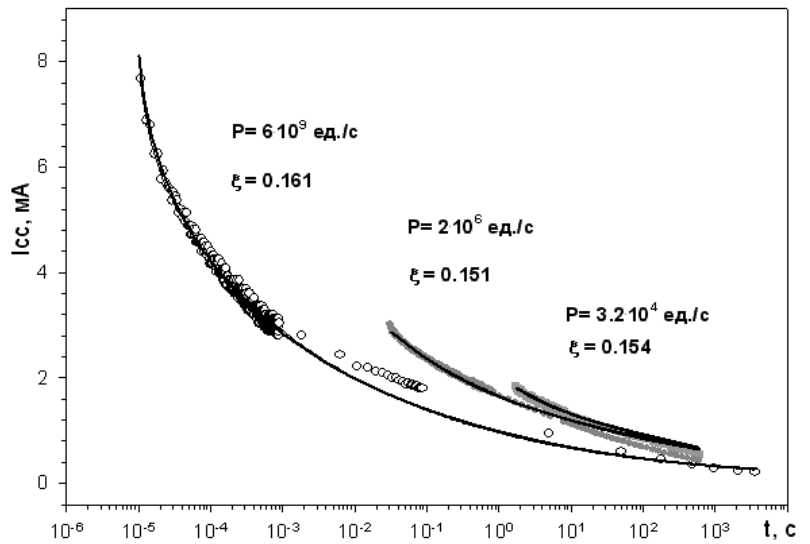


Рис. 4. Релаксация тока потребления КНС БИС при различных мощностях набора дозы.

Прогнозирование радиационного поведения КНС БИС при импульсном характере набора дозы

Полученные результаты могут служить основой подхода к прогнозированию импульсной реакции КНС БИС по результатам испытаний, в частности, прогнозирования постимпульсных значений параметра-критерия годности (ПКГ) БИС для требуемого момента времени t_0 , соответствующего предельному значению ВПР. Прогнозная оценка может быть получена, по крайней мере, двумя способами.

1. По результатам облучения до требуемой дозы при максимально достижимом уровне мощности дозы определяются параметры выражений (2) и значение ПКГ БИС для момента времени t_0 .

2. Прогноз строится в два этапа. На первом этапе проводится облучение БИС до требуемого уровня дозы D_m с максимально достижимой интенсивностью P_1 , обеспечивающей накопление требуемой дозы. После этого в течение некоторого времени t_a проводится отжиг БИС в электрическом режиме, соответствующем облучению. При этом необходимо добиваться выполнения условия
$$t_a > (10^1 \dots 10^3) D_m / P_1. \quad (3)$$

Далее проводится радиационный отжиг для восстановления параметров БИС. На втором этапе проводится облучение с максимально достижимой интенсивностью P_2 длительностью $t_2 < (10^{-1} \dots 10^{-2}) t_0$.

После прекращения облучения проводится отжиг БИС в течение времени t_a (3).

Прогноз величины ПКГ X для момента времени t_0 и требуемого уровня воздействия D_m определяется как $X(t_0, D_m) = X(t_0, P_2 t_2, P_2) \frac{X(t_a, D_m, P_1)}{X(t_a, P_2 t_2, P_2)}$, где $X(t_0, D_m)$ - значение ПКГ БИС в момент времени t_0 при уровне дозы D_m , $X(t_0, P_2 t_2, P_2)$, $X(t_a, P_2 t_2, P_2)$ - значения ПКГ, измеренные на втором этапе процедуры в моменты времени t_0 и t_a соответственно, $X(t_a, D_m, P_1)$ - значение ПКГ, измеренное на первом этапе процедуры в момент времени t_a .

Параметры облучения (интенсивности и длительности лабораторного воздействия на этапах 1 и 2) определяются, в первую очередь, техническими возможностями моделирующих установок и имитаторов.

Развитие методических и технических средств экспериментальных исследований дозовых эффектов в КМОП КНС БИС при ИИВ

Рентгеновское излучение (РИ) постоянной средней интенсивности обладает пониженной энергией квантов по сравнению с ИИ МУ, что обуславливает значимое поглощение энергии РИ в подложке КНС структуры. Для сапфировой подложки экспериментальная и рассчитанная в среде GIANT оценка поглощения РИ в КНС структуре показала ослабление интенсивности в ~ 5 раз. Поглощение доли РИ в толще подложки обуславливает различие темпов дозовой деградации утечек КНС структуры при воздействии РИ и высокоэнергетичного гамма-излучения. В ходе работы была обоснована корректность использования рентгеновских имитаторов при условии калибровки РИ «по эффекту», что предполагает проведение испытаний малой выборки КНС БИС на МУ и получение коэффициента пересчета интенсивности. Для обеспечения эквивалентного состояния РИЗ в приграничной области, рекомендуется проводить облучение КНС БИС со стороны подложки.

В ходе работы проведено развитие испытательного комплекса, адаптированного для сопряжения с различными типами МУ и РИ. Обеспечена помехоустойчивость информаци-

онных линий (применение двойного экранирования кабелей, гальваническая развязка с установкой, расчет согласования кабельных линий, экранирование электромагнитных наводок). Электрический режим работы КНС БИС непосредственно во время воздействия задается от автономного источника питания. Введены цепи развязки по питанию БИС, защита от обратного электрического смещения.

Модернизированная схема измерения и задания режима позволила определять импульсную реакцию выходных уровней КНС БИС непосредственно в процессе ИИВ и дозовую реакцию тока потребления сразу после окончания воздействия.

Методика неразрушающего контроля дозовой стойкости КМОП КНС БИС

Полученные результаты сформировали научную базу для разработки методики 100%-го неразрушающего контроля КМОП КНС БИС. Основой методики является эффект радиационно-стимулированного отжига, т.е. восстановления статического тока потребления КНС БИС к первоначальному значению при облучении БИС с заземленными выводами. Алгоритм проведения радиационной отбраковки (РО) предполагает облучение определительной группы КНС БИС до уровня дозы, соответствующего максимуму дозовой зависимости тока потребления, или до максимальной дозы D_{max} . Далее определяется коэффициент сужения поля допуска (КСПД) по формуле (4).

$$K_i = \frac{I_{CC(D_{Max})i}}{I_{CC(D_0)i}}; \quad K = \frac{1}{n} \sum_i K_i \quad (4),$$

где $I_{CC(D_{Max})i}$ и $I_{CC(D_0)i}$ - токи потребления КНС БИС при воздействии максимального и меньшего тестового уровня дозы. Величина тестовой дозы должна соответствовать линейному участку дозовой зависимости критериального параметра при данной интенсивности воздействия. Для исследованных БИС оптимальная величина тестовой дозы составила $(3,0 \dots 4,0) \cdot 10^4$ ед.

Показано, что распределение КСПД близко к нормальному независимо от вида распределения ПКГ. В этом случае оценка «наихудшего случая» КСПД производится с учетом заданного уровня доверительной вероятности $\gamma = 1 - \alpha$ и вероятности сохранения работоспособности согласно (5):

$$K_{MinMax} \approx \bar{K} + \sigma \cdot \Theta(n, \alpha, R), \quad (5)$$

$$\bar{K} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i, \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (K_i - \bar{K})^2}, \quad \Theta(n, \alpha, R) = \frac{1}{\sqrt{n}} t_{n-1, 1-\alpha/2} + \sqrt{\frac{(n-1)}{\chi_{n-1, \alpha/2}^2}} Z_R,$$

где n - объем определительной группы, $t_{n-1, 1-\alpha/2}$ - квантиль распределения Стьюдента с $n-1$ степенями свободы уровня $\alpha/2$, $\chi_{n-1, \alpha/2}^2$ - квантиль χ^2 -распределения, отвечающая уровню значимости $1-\alpha/2$, Z_R - квантиль стандартного нормального распределения, отвечающая уровню сохранения работоспособности R .

Остальные образцы партии КНС БИС облучаются тестовой дозой, разбраковка ведется в соответствии с алгоритмом, приведенным на рис. 5.

Сравнительные данные РО (облучения тестовой дозой с последующим радиационным отжигом) и верификационного облучения показали высокую степень корреляции радиационного поведения БИС до и после радиационного отжига (РО не изменила радиационного поведения и показателей стойкости БИС), а также отсутствие значимого влияния процедуры РО на эксплуатационные характеристики микросхем (эффективное восстановление критериальных параметров после облучения и отжига) (рис. 6).

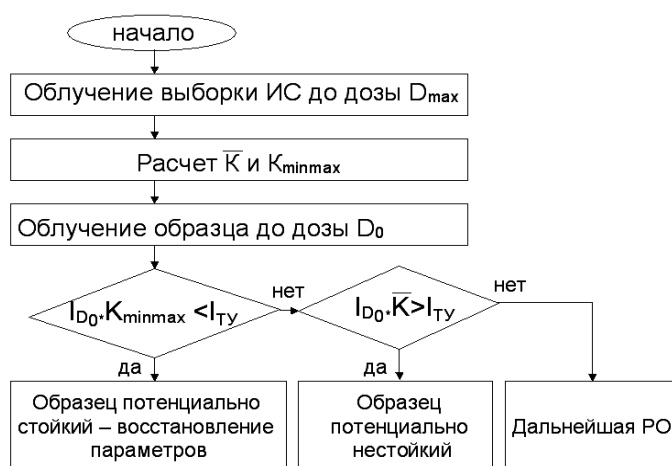


Рис. 5. Порядок отбраковки по обобщенной методике (I_{Ty} – норма на I_{cc} БИС)

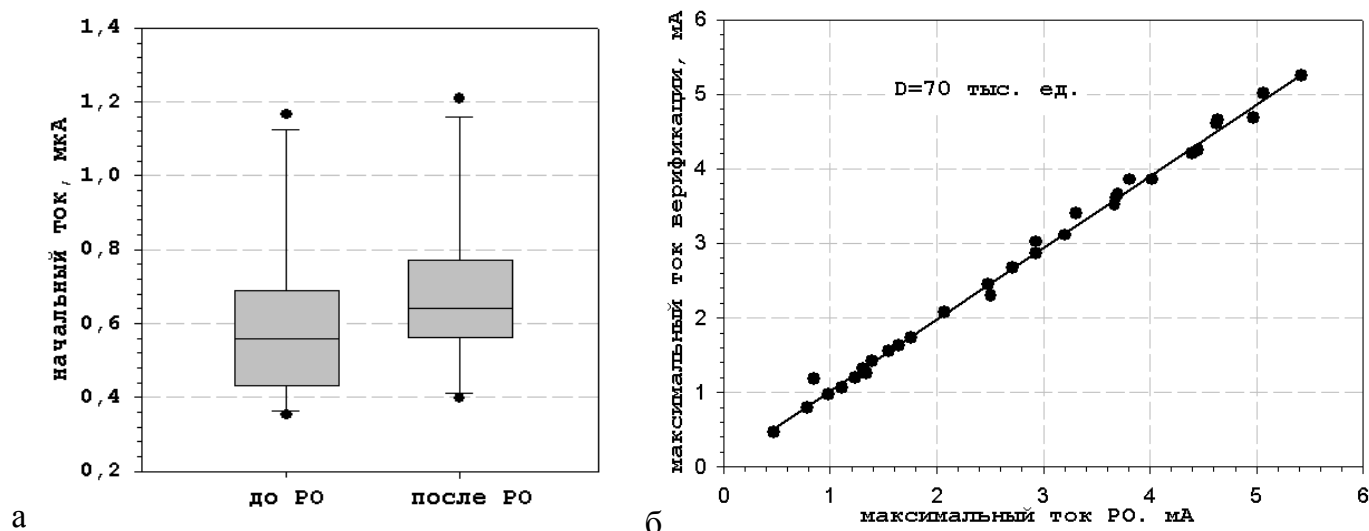


Рис. 6. Диаграмма I_{CC0} (а) и регрессионная зависимость I_{CCmax} (б) на этапах РО и верификации КНС БИС ВА1

Предложенная методика применима как к бескорпусным КНС БИС, так и к БИС, выполненным в металлокерамических и пластиковых корпусах. При проведении РО корпусированных КНС БИС рекомендуется в качестве источника ИИ применять мощные рентгеновские источники (РИ) или ускорители электронов в режиме генерации гамма-излучения. Кроме того, для адекватности дозиметрии РО рекомендуется проводить облучение со стороны керамического основания корпуса.

Суммарная доза воздействия для исследованных групп КНС БИС не должна превышать 200 тыс. ед. Свыше данного уровня наблюдаются необратимые изменения величины I_{CC0} вследствие образования радиационно-индуцированных поверхностных состояний.

Практическая реализация методики РО состоит в разработке и внедрении в ФГУП ФНПЦ НИИС технологической операции и реализующих ее экспериментальных комплексов, адаптированных для РО КНС БИС различных конструктивных исполнений (в металлокерамических корпусах, на полиимидных носителях и кристаллов на пластинах). К настоящему времени разбраковке были подвергнуты более 1000 образцов микросхем. Не было выявлено ни одного отказа микросхем, признанных годными при операции РО, или укомплектованных ими приборов в ходе их испытаний в РФЯЦ ВНИИЭФ.

Исследование и прогнозирование стойкости микросхем на КНД структурах к дозовым воздействиям

Исследование влияния параметров техпроцесса на дозовую стойкость КМОП КНС БИС

Анализ результатов многочисленных исследований и испытаний КМОП КНС БИС показал, что микросхемы, имеющие более высокий начальный ток потребления, характеризуются меньшими темпами роста и меньшей величиной достигнутого значения тока (рис. 7). Такие различия связаны с нестабильностью процесса имплантации бора при легировании области р-кармана.

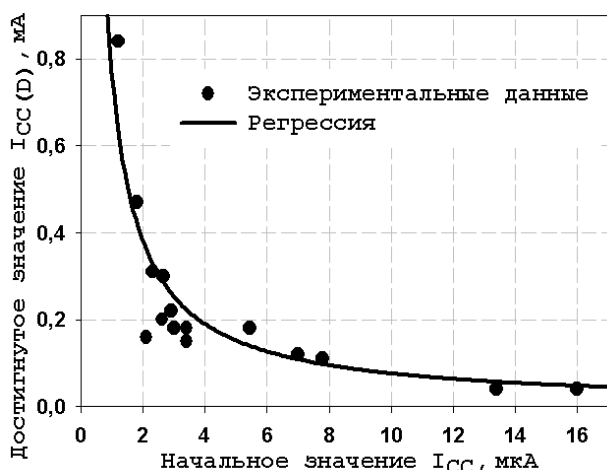


Рис. 7. Диаграмма начальных и достигнутого в процессе облучения значений I_{CC} КНС БИС

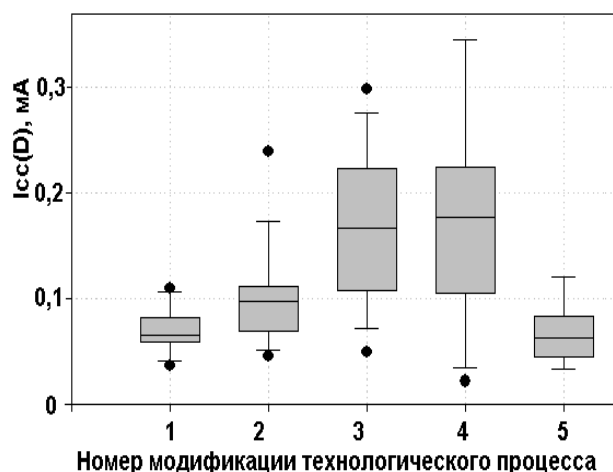


Рис. 8. Диапазоны достигнутых при облучении значений I_{CC} КНС БИС с различными дозами легирования р-карманов

Разброс и значение токов потребления КНС БИС зависят от изменения дозы имплантации бора. Максимум тока потребления при дозовом воздействии наблюдается в области доз легирования в диапазоне десятых долей $\text{мкКл}\cdot\text{см}^2$ (рис. 8). При этих дозах также наблюдается максимальный разброс значений тока потребления. При больших дозах возрастает сопротивление паразитного канала, а при меньших - уменьшается концентрация центров образования заряда в сапфире. При этом начальный ток потребления с ростом дозы легирования уменьшается. Выявленная особенность позволила обеспечить снижение токовых утечек и уменьшить величину разброса тока потребления КНС БИС по пластине.

Введение дополнительных проводящих слоев в области стока-истока МОПТ КНС БИС позволило уменьшить утечки в исследованных группах КНС БИС до 5...10 раз.

Изменение толщины приборного слоя сильно влияет на долю утечек в формировании тока потребления КНС БИС: увеличение толщины приборного слоя ведет, с одной стороны, к уменьшению утечек, а с другой стороны, к ухудшению показателей стойкости при ИИВ. Показано, что оптимальное сочетание высокого уровня импульсной стойкости при минимальных утечках достигается при толщине приборного слоя около 0,4 мкм.

Впервые проведены сравнительные исследования радиационного поведения отечественных КНС БИС и СВЧ КНС БИС иностранного производства с ультратонким приборным слоем $UTSi^{\circledR}$. Наиболее чувствительным параметром дозовой деградации $UTSi^{\circledR}$ ИС, как и в отечественных КНС микросхемах, является ток потребления. Полученные результаты определяют потенциальную возможность использования предложенных методик для прогнозирования дозовой стойкости КНС БИС, изготовленных по технологии $UTSi^{\circledR}$.

Впервые проведено «прямое» сравнение радиационного поведения КНС и КНИ БИС, изготовленных по эквивалентным шаблонам. Результаты исследований указывают на близость основных закономерностей радиационного поведения. Выявлен эффект восстановления начального значения тока потребления КНИ БИС при отрицательном смещении около 1В на общей подложке. Полученные результаты определяют потенциальную возможность использования методики РО для прогнозирования дозовой стойкости КНИ БИС и СБИС.

Долговременные исследования дозовой стойкости КМОП КНС БИС

С целью выявления механизмов деградации радиационной стойкости КНС БИС в процессе эксплуатации или хранения был проведен эксперимент по ускоренному старению. Несколько групп микросхем, принадлежащих к одной технологической партии, были подвергнуты облучению тестовой дозой с хранением при $T=+125^{\circ}C$ в течение различного времени. Выявлено монотонное снижение I_{CCmax} с течением времени выдержки. Общий тренд зависимости сохранялся (рис. 9) на протяжении 180 суток выдержки при повышенной температуре. При этом снижение тока в процессе эксплуатации КНС БИС слабо зависело от изменения температуры в пределах рабочего режима микросхем. Энергия активации процесса, ответственного за снижение тока потребления, составляет менее 0,3 эВ.

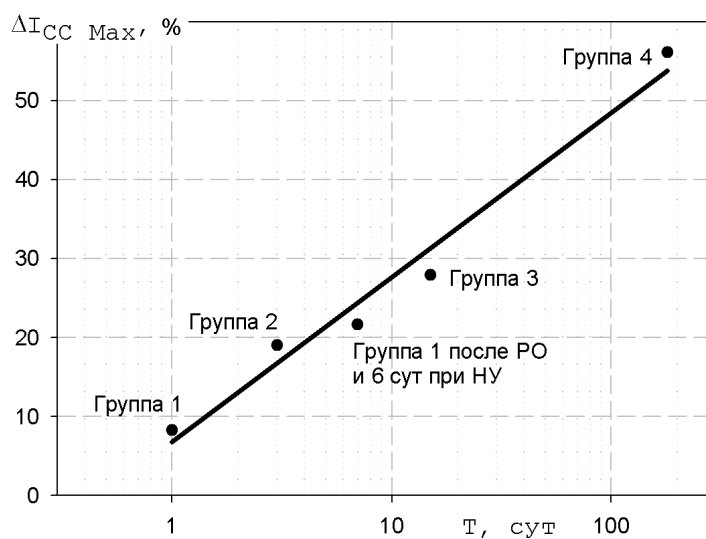


Рис. 9. Относительное уменьшение I_{CCmax} при выдержке групп КНС БИС при $T=+125^{\circ}C$.

Следует заметить, что при длительной эксплуатации или хранении уровень дозовой стойкости КНС БИС по критерию статического тока потребления увеличивается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации заключаются в следующем:

1. Установлено, что доминирующим механизмом дозовых отказов цифровых КМОП КНС БИС при уровнях доз до 200 тыс. ед. является накопление радиационно-индуцированного заряда на границе раздела Si / Al₂O₃, образование связанных с этим токов утечки n-канальных МОП-транзисторов и сверхнормативное возрастание тока потребления КМОП КНС БИС в целом. Экспериментально установлено, что характерное время переноса зарядов в сапфире подложки составляет единицы наносекунд, что позволяет исключить данные механизмы из рассмотрения при моделировании дозового отклика КНС БИС при ИИВ. Установлен нелогарифмический характер релаксации радиационно-индуцированного заряда при временах порядка ~ 1с после импульсного воздействия; в области больших времен темпы релаксации принимают логарифмический характер.

2. Предложена модель релаксации радиационно-индуцированного заряда в КНС структуре после дозового воздействия, учитывающая импульсный характер набора дозы, профиль распределения РИЗ вблизи границы приборного слоя и сапфировой подложки и электрический режим КНС структуры, и позволяющая прогнозировать уровень тока потребления КНС БИС в произвольный момент времени после ИИВ.

3. Разработана методика прогнозирования радиационного отклика КНС БИС на воздействие заданной интенсивности по результатам имитационных испытаний и минимального объема испытаний на моделирующих установках. Данные, полученные при имитирующем воздействии или воздействии средней интенсивности, экстраполируются в область требуемых уровней воздействия. Импульсное воздействие с максимальной интенсивностью служит для определения параметров экстраполяции. Точность прогноза зависит от интенсивности воздействия на этапе определения параметров экстраполяции и увеличивается при увеличении интенсивности тестового воздействия.

4. На основе эффекта радиационно-стимулированного отжига разработана методика и развиты технические средства сплошного неразрушающего контроля стойкости производственных партий КМОП КНС БИС по критерию тока потребления. Научно обоснованы и экспериментально подтверждены режимы облучения и отжига, обеспечивающие высокую достоверность прогноза и его неразрушающий характер. Разработана оригинальная методика, позволяющая прогнозировать отказ образца КМОП КНС БИС при заданном уровне дозового воздействия большой интенсивности по результатам контрольного лабораторного облучения этого образца малой дозой стационарного ИИ средней интенсивности.

5. Проанализированы и развиты методы повышения стойкости КМОП КНС БИС на основе рационального выбора толщины приборного слоя КНС структуры, введения дополнительных проводящих слоев в областях стока-истока, а также параметров имплантации бора на этапе легирования.

Основной практический результат диссертации заключается в разработке и развитии

методических и технических средств неразрушающего контроля дозовой стойкости производственных партий КМОП КНС БИС различного конструктивного исполнения БИС (на полиимидных носителях, на пластинах и в металлокерамических корпусах). РО введена в качестве технологической операции процесса производства КМОП КНС БИС в ФГУП «ФНПЦ НИИИС» и отработана на более чем десяти производственных партиях из более 1000 образцов БИС различной степени интеграции и функционального назначения, в том числе комплектующих аппаратуру ракетного комплекса «Искандер».

Частные практические результаты работы и их реализация:

1. Проведена адаптация оборудования радиационного эксперимента для сопряжения с различными источниками дозового воздействия, обеспечивающая снижение уровня помех и мониторинг критериального параметра непосредственно в процессе и после ИИВ.

2. Проведен комплекс экспериментальных исследований, направленных на повышение уровня стойкости производственных партий КМОП КНС БИС. Впервые для отечественных КНС БИС обоснован выбор толщины приборного слоя 0,4мкм, обеспечивающий наилучшее соотношение стойкости и стабильности функционирования.

3. Экспериментально установлено снижение величины статического тока потребления КНС БИС при введении дополнительных проводящих слоев силицида титана в области стоков и истоков МОП транзисторов. Отмечено снижение тока потребления модифицированных КНС БИС на порядок.

Экспериментально установлены зависимости темпов дозовой деградации тока потребления КНС БИС при изменении дозы и энергии ионов бора на этапе легирования.

4. Проведена экспериментальная оценка изменения величины тока потребления КНС БИС в течение длительного времени эксплуатации или хранения. Показано снижение максимальной величины радиационно-индуцированных токовых утечек в КМОП КНС БИС при эксплуатации или хранении микросхем в течение длительного времени.

5. Проведены исследования дозовой деградации критериальных параметров стойкости UTSi[®] КНС ИС производства ф. Peregrine. Одним из основных механизмов параметрического отказа микросхемы являлось повышение тока потребления. Впервые получены оригинальные результаты сравнительных исследований дозовых эффектов в КНС и КНИ БИС, показывающие близость основных закономерностей их радиационного поведения и определяющие потенциальную возможность использования предложенных методик для прогнозирования дозовой стойкости КНИ БИС и СБИС.

Таким образом, в ходе работы над диссертацией достигнута ее основная цель, а именно, разработаны и развиты научно обоснованные методические и технические средства прогнозирования дозовых эффектов в цифровых КМОП КНС БИС при ИИВ с учетом реальных характеристик воздействия, режимов и условий работы микросхем в аппаратуре.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Методика оперативного неразрушающего контроля дозовой стойкости КМОП БИС на КНС-структурах / Давыдов Г.Г., Согоян А.В., Никифоров А.Ю. и др. // Микроэлектроника. – 2008. – Т.37. – №1. – С. 67-77.
2. Моделирование ионизационной реакции элементов КМОП КНС микросхем при импульсном ионизирующем воздействии / Киргизова А.В., Никифоров А.Ю., Давыдов Г.Г. и др. // Микроэлектроника. – 2008. – Т.37. – №1. – С. 1-17.
3. Давыдов Г.Г. Усовершенствованная методика разбраковки партий КМОП КНС ИС // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. научн. трудов. – М.: МИФИ, 2005. – С. 216-218.
4. Способ разбраковки КМОП микросхем, изготовленных на КНД структурах, по стойкости к радиационному воздействию // Яшанин И.Б., Никифоров А.Ю., Давыдов Г.Г. и др. // Заявка на изобретение, приоритет №2007146805 от 17.12.2007 г.
5. Применение радиационно-стимулированного отжига для контроля стойкости партий КНС КМОП БИС на этапе производства / Давыдов Г.Г., Согоян А.В., Никифоров А.Ю. и др. // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. научн. трудов. – М.: МИФИ, 2003. – С. 215-218.
6. Методика неразрушающего контроля КМОП КНС ИС в процессе производства. Исследование влияния радиационного отжига на характеристики КНС ИС / Давыдов Г.Г., Согоян А.В., Никифоров А.Ю. и др. // Радиационная стойкость электронных систем. – 2004. – Вып. 7. – С. 187-188.
7. Методика неразрушающего контроля КМОП КНС ИС в процессе производства. Оценка коэффициента сужения поля допуска / Давыдов Г.Г., Согоян А.В., Никифоров А.Ю. и др. // Радиационная стойкость электронных систем. – 2004. – Вып. 7. – С. 189-190.
8. Согоян А.В., Давыдов Г.Г. Тестовая структура для исследования радиационного поведения КНС МОПТ // Радиационная стойкость электронных систем. – 2004. – Вып. 7. – С. 79-80.
9. Исследование радиационно-индуцированной проводимости в системе Al/Al₂O₃/Al / Согоян А.В., Давыдов Г.Г., Киргизова А.В., Поляков И.В. // Радиационная стойкость электронных систем. – 2005. – Вып. 8. – С. 51-52.
10. Согоян А.В., Давыдов Г.Г. Особенности пострadiационных релаксационных процессов в КНС ИС // Радиационная стойкость электронных систем. – 2005. – Вып. 8. – С. 49-50.
11. Давыдов Г.Г., Согоян А.В., Яшанин И.Б. Учёт импульсного характера набора дозы при проведении испытаний КМОП КНС ЦИС // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. научн. трудов. – М.: МИФИ, 2006. – С. 192-196.
12. Давыдов Г.Г., Ятманов А.П. Радиационные исследования ИС с шунтирующими слоями TiSi₂ // Радиационная стойкость электронных систем. – 2005. – Вып. 8. – С. 77-78.
13. Влияние режима имплантации бора на дозовую деградацию тока потребления КМОП КНС БИС / Давыдов Г.Г., Яшанин И.Б., Скобелев А.В., Маслов В.В. // Радиационная стойкость электронных систем. – 2008. – Вып. 11. – С.51-52.
14. Применение методики неразрушающего контроля дозовой стойкости КМОП КНС БИС / Г.Г. Давыдов, А.В. Согоян, А.Г. Петров и др. // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем. Сб. научн. трудов. – М.: ИППМ РАН, 2008. – С. 280-286.
15. Исследование влияния потенциала подложки и толщины подзатворного окисла на уровень стойкости КМОП КНИ БИС к дозовым воздействиям / Давыдов Г.Г., Петров А.Г., Киргизова А.В. и др. // Радиационная стойкость электронных систем. – 2007. – Вып. 10. – С. 71-72.
16. Давыдов Г.Г., Пыжьянова В.Е. Изменение радиационной чувствительности КМОП КНС микросхем в условиях хранения при повышенной температуре // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. научн. трудов. – М.: МИФИ, 2008. – С. 191-194.