

На правах рукописи

Бакеренков Александр Сергеевич

**КОНВЕРСИОННАЯ МОДЕЛЬ ЭФФЕКТА НИЗКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ В
БИПОЛЯРНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМАХ КОСМИЧЕСКОГО
НАЗНАЧЕНИЯ**

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:



МОСКВА – 2013 г.

Диссертация выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

Научный руководитель:

доктор технических наук
Першенков Вячеслав Сергеевич,
заведующий кафедрой «Микро- и наноэлектроники»
НИЯУ «МИФИ», г. Москва

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
начальник отдела,
ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова
Бутин Валентин Иванович

кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник –
начальник сектора ФГУП ЦНИИмаш
Ужегов Вячеслав Михайлович

Ведущая организация:

ОАО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники и завод «Микрон»

Защита состоится «15» апреля 2013 г. в 15 час. 00 мин. На заседании диссертационного совета Д212.130.02 в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» по адресу 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31, тел. (499) 323-91-67.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ «МИФИ».

Автореферат разослан « 14 » марта 2013 г.

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

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



П.К. Скоробогатов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы диссертации. При воздействии низкоинтенсивного ионизирующего излучения (ИИ) может происходить аномальное уменьшение (до порядка и выше) коэффициента усиления биполярных транзисторов, как npn так и pnp типа, по сравнению с облучением высокой интенсивностью при одинаковой накопленной дозе. В результате аппаратура на борту спутников, содержащая биполярные микросхемы, может выйти из строя ранее запланированного времени функционирования. Для прогнозирования, например, десятилетнего пребывания микросхем на орбите необходимо использование источника излучения на 3-4 порядка большей интенсивности, чем интенсивность излучения в космосе, чтобы уменьшить продолжительность лабораторного эксперимента. Создание методик прогнозирования требует разработки физической модели эффекта низкой интенсивности. Использование физической модели эффекта предполагает экспериментальную экстракцию параметров с последующим расчетом радиационной деградации при заданной дозе и интенсивности облучения.

У современных физических моделей, как будет показано ниже, многочисленные подстроечные параметры, характеризующие кинетику процессов (сечения и темп захвата носителей, концентрация рекомбинационных центров и т.п.), задаются произвольно и не могут быть экстрагированы непосредственно из эксперимента. Поэтому модели могут дать лишь качественную характеристику процесса накопления поверхностных состояний при больших и малых интенсивностях. Это затрудняет практическое использование моделей в целях прогнозирования.

В существующих моделях отсутствует связь плотности заряда в окисле и плотности поверхностных состояний с током поверхностной рекомбинации биполярных транзисторных структур, являющегося основным радиационно-чувствительным параметром биполярных приборов. Поскольку при радиационных испытаниях измеряются не плотность поверхностных состояний и плотность заряда в окисле, а токи (входные токи операционных усилителей (ОУ) и компараторов напряжения (КН), токи баз биполярных транзисторов (БТ)), экстракция параметров данных моделей на основе результатов радиационных испытаний затруднительна.

Для экспериментальной экстракции параметров модели эффекта низкой интенсивности необходима формулировка требований к контрольно-измерительному оборудованию как по точностным параметрам, так и по функциональным возможностям. Физическая модель эффекта может иметь несколько методик экстракции параметров. Выбор конкретной методики определяется характеристиками и функциональными возможно-

стями контрольно-измерительного оборудования. Таким образом, задачи разработки модели эффекта низкой интенсивности и методики экстракции параметров данной модели тесно связаны с разработкой контрольно-измерительного оборудования для радиационных экспериментов.

Цель диссертации заключается в создании физической модели эффекта низкой интенсивности в биполярных микросхемах и методики экстракции параметров модели, позволяющей оценивать радиационную деградацию биполярных приборов, предназначенных для применения в условиях воздействия излучений космического пространства.

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

- Определение зависимости тока поверхностной рекомбинации в биполярных транзисторных структурах от плотности поверхностных состояний.
- Разработка конверсионной модели эффекта низкой интенсивности в биполярных структурах и методик экстракции параметров модели.
- Разработка оборудования для экспериментальных исследований радиационной деградации биполярных интегральных микросхем (ИМС) и дискретных приборов.
- Разработка методик измерения радиационно-чувствительных параметров операционных усилителей, компараторов и дискретных транзисторов.
- Разработка методики дистанционного задания и контроля температуры кристаллов ИМС при облучении и послерадиационном отжиге.
- Экспериментальная экстракция параметров конверсионной модели и разработка методики радиационных испытаний для оценки срока работы биполярных микросхем в условиях воздействия ионизирующих излучений низкой интенсивности.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Метод определения тока поверхностной рекомбинации биполярных транзисторных структур как функции плотности поверхностных состояний.
2. Конверсионная модель эффекта низкой интенсивности в биполярных ИМС, позволяющая оценивать радиационную деградацию электрических параметров биполярных приборов при заданных значениях поглощенных доз и интенсивностей облучения, характерных для космических применений.

3. Методика экстракции параметров конверсионной модели эффекта низкой интенсивности в биполярных приборах.
4. Методика для выявления приборов, в которых наблюдается эффект низкой интенсивности, на основе анализа динамики послерадиационного отжига.
5. Программно-аппаратная реализация методик измерения радиационно-чувствительных параметров операционных усилителей (ОУ) и компараторов напряжения (КН) при радиационных испытаниях.

Научная новизна диссертации

1. Определена зависимость тока поверхностной рекомбинации биполярных транзисторных структур от плотности поверхностных состояний с учетом их заряда, позволяющая создать модель эффекта низкой интенсивности, дающую связь радиационно-чувствительных параметров биполярных ИМС с дозой и интенсивностью облучения.
2. Предложена физическая модель эффекта низкой интенсивности в биполярных ИМС с минимальным набором подстроечных параметров, которые имеют простой физический смысл и могут быть определены экспериментально.
3. Предложена и опробована экспериментальная методика экстракции параметров конверсионной модели, позволяющая разработать методику прогнозирования работоспособности биполярных микросхем в условиях воздействия излучения низкой интенсивности.

Практическая значимость диссертации заключается в следующем:

1. Разработана методика выявления эффекта низкой интенсивности в биполярных микросхемах и дискретных приборах на основе установленной корреляции наличия эффекта низкой интенсивности и дальнейшей деградации при послерадиационном отжиге.
2. Разработано устройство для измерения параметров различных видов интегральных микросхем и дискретных приборов при радиационных испытаниях. Использование данного устройства внедрено в лабораторный практикум «Физика микроэлектронных структур» кафедры Нано- и микроэлектроники НИЯУ МИФИ.
3. Разработаны методики измерения радиационно-чувствительных параметров операционных усилителей, ком-

параторов и дискретных транзисторов. Разработанные методики внедрены в «ФГУП НИИП» г. Лыткарино.

4. Разработана методика дистанционного задания и контроля температуры кристаллов ИМС при облучении и послерадиационном отжиге, позволяющая проводить эксперименты по экстракции параметров конверсионной модели с использованием разработанного измерительного оборудования.

Апробация результатов диссертации Основные результаты диссертации докладывались на ежегодных Научных сессиях МИФИ (2008-2012); ежегодных всероссийских конференциях «Радиационная стойкость» (Лыткарино, 2008 - 2012), ежегодных Курчатовских молодежных научных школах (2009 - 2011), в материалах IX Межотраслевой конференции по радиационной стойкости (Снежск 2011), международных конференциях ICNBE 2011 и RADECS 2009.

Опубликованные результаты

Основные результаты диссертации опубликованы в 8 статьях журналов перечня ВАК: «Датчики и системы», «Ядерная физика и инжиниринг», «Микроэлектроника», «Вопросы атомной науки и техники».

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации – 174 страницы. Диссертация содержит 54 рисунка. Список литературы содержит 67 наименований.

В первой главе дается аналитический обзор экспериментальных исследований радиационной стойкости биполярных приборов и физических моделей эффекта низкой интенсивности. Показано, что ни одна из предложенных моделей не может описать всех имеющихся на сегодняшний день экспериментальных данных, и не может быть использована для прогнозирования работоспособности биполярных приборов в условиях воздействия излучения низкой интенсивности. Во второй главе приводится расчет поверхностной составляющей рекомбинационного тока базы биполярного транзистора, поскольку именно она является основной причиной отказов биполярных приборов в условиях низкоинтенсивного радиационного воздействия. В третьей главе представлена конверсионная модель эффекта низкой интенсивности. Получено расчетное соотношение, позволяющее по известным параметрам модели получить дозовую зависимость радиационной деградации биполярных приборов при любой мощности дозы. В четвертой главе описано измерительное устройство, разработанное для экспериментальных исследований радиационной деградации би-

полярных приборов. Данное устройство использовалось при всех экспериментах, методика и результаты которых приведены в пятой главе. В шестой главе описаны методики экстракции параметров конверсионной модели эффекта низкой интенсивности. Разработанный подход был проверен с использованием данных по высокотемпературному облучению и послерадиационному отжигу.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение

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

1. Обзор моделей и методик прогнозирования эффекта низкой интенсивности в биполярных ИМС

Существует много моделей для объяснения физических причин эффекта низкой интенсивности в биполярных ИМС, которые можно разделить на две категории: 1) модели увеличения выхода заряда в окисле при низкоинтенсивном облучении (модели пространственного заряда, модель мелких ловушек), 2) модели увеличения темпа встраивания поверхностных состояний на границе кремния и пассивирующего окисла при снижении мощности дозы (бимолекулярные модели, модели, основанные на решении уравнений переноса протонов и дырок в окисле).

Модели увеличения выхода заряда в окисле не могут с единых позиций объяснить эффект низкой интенсивности и в npn и в ppn транзисторах. Радиационно-индуцированный заряд в окисле ($Q_{\text{от}}$) изменяет соотношение концентрации основных и неосновных носителей в приповерхностных областях баз биполярных транзисторных структур. Поскольку заряд $Q_{\text{от}}$ всегда положителен, его влияние на рекомбинационные составляющие базовых токов биполярных npn и ppn транзисторов должно качественно различаться. В транзисторах ppn типа радиационно-индуцированное увеличение заряда в окисле приводит к увеличению избыточной концентрации электронов в приповерхностных областях баз и, как следствие, к увеличению темпа поверхностной рекомбинации. В ppn транзисторах неосновными носителями в базовых областях являются дырки, концентрация которых снижается под действием увеличения положительного заряда $Q_{\text{от}}$. Таким образом, увеличение выхода положительного заряда в окисле должно приводить к увеличению базовых токов только в npn транзисторах, однако, эксперименты показывают, что радиационная деградация ppn транзисторов так же увеличивается при низкоинтенсивном облучении, что не может являться следствием увеличения выхода заряда $Q_{\text{от}}$.

Объяснить эффект низкой интенсивности и в npn , и в ppn транзисторах позволяет учет влияния увеличения плотности поверхностных состояний N_{it} при воздействии ионизирующего излучения на темп поверхностной рекомбинации в базовых областях биполярных транзисторов. Поверхностные состояния имеют заряд, который определяется положением уровня Ферми в приповерхностной области базы относительно середины запре-

щенной зоны. Заряд поверхностных состояний может быть как положительным, так и отрицательным. При радиационно-индуцированном накоплении поверхностных состояний он может оказывать существенное влияние на темп поверхностной рекомбинации. В моделях увеличения выхода заряда в окисле, влияние заряда поверхностных состояний не рассматривается.

Модели, описывающие эффект низкой интенсивности как следствие увеличения темпа встраивания поверхностных состояний, как на основе влияния пространственного заряда, так и на основе бинарных реакций, качественно согласуются с экспериментальными данными. Однако использование данных моделей для прогнозирования эффекта низкой интенсивности затруднительно из-за большого набора подстроечных параметров, экспериментальная экстракция которых в ряде случаев невозможна. Ни в одной из рассмотренных моделей не исследуется связь плотности поверхностных состояний с поверхностной рекомбинационной составляющей тока базы биполярных транзисторов с учетом заряда поверхностных состояний, который может оказывать влияние на концентрацию электронов и дырок в приповерхностных областях баз транзисторов и влиять на темп поверхностной рекомбинации.

Таким образом, остается актуальной задача создания модели радиационно-индуцированной деградации биполярных приборов, обладающей минимальным набором подстроечных параметров, методика экстракции которых из экспериментальных данных технически реализуема как в части создания измерительного оборудования, удовлетворяющего требованиям данной методики, так и в части проведения расчетов для вычисления значений параметров модели.

2. Расчет тока поверхностной рекомбинации в биполярных микроэлектронных структурах при воздействии ионизирующего излучения

При воздействии излучения космического пространства деградация коэффициента усиления биполярных транзисторов происходит за счет увеличения поверхностной рекомбинации или поверхностной составляющей тока базы. Увеличение рекомбинационных потерь связано с накоплением положительного заряда в объеме пассивирующего окисла и встраиванием поверхностных состояний на границе раздела окисел-полупроводник. Существующие на сегодняшний день расчетные модели тока поверхностной рекомбинации не учитывают влияние заряда поверхностных состояний на величину поверхностного потенциала и, следовательно, на величину тока рекомбинационных потерь. Этот фактор является принципиальным, так как его игнорирование не позволяет с единых позиций описать радиационную деградацию n и p транзисторов.

В данной главе приведен расчет тока поверхностной рекомбинации в биполярных транзисторах, как функции заряда поверхностных со-

стояний, величина которого определяется положением квазиуровней Ферми при прямом смещении эмиттерного перехода. Полученные соотношения могут быть положены в основу физической модели эффекта низкой интенсивности в биполярных транзисторах.

Расчет тока поверхностной рекомбинации проводится при следующих допущениях:

1. Задача вычисления рекомбинационных потерь в пассивной области базы является принципиально двумерной, так как изменение концентрации инжектированных носителей обусловлено как влиянием эффективного заряда в окисле (сумма зарядов в объеме окисла и на поверхностных состояниях), создающего электрическое поле по координате x , так и рекомбинацией по мере их диффузионного движения вдоль координаты y . Для упрощения используется квазидвумерное приближение: действие электрического поля эффективного заряда и градиента диффузии на движение носителей является независимым.

2. Темп поверхностной рекомбинации вычисляется в предположении однородного распределения поверхностных состояний в запрещенной зоне кремния по энергии. Плотность состояний по всей запрещенной зоне принимается постоянной и равной плотности состояний в середине запрещенной зоны. Это предположение оправдано тем, что процесс рекомбинации определяется в основном центрами, расположенными в середине запрещенной зоны, и эффективность рекомбинации экспоненциально падает по мере удаления от середины зоны.

3. Считается справедливым наиболее часто используемое предположение о том, что поверхностные состояния в верхней половине запрещенной зоны кремния имеют акцепторную природу, а в нижней — донорную. В соответствии с этим, если уровень Ферми находится вблизи зоны проводимости, т.е. все уровни в запрещенной зоне заполнены электронами, то на состояниях в верхней половине запрещенной зоны накапливается отрицательный заряд, а в нижней половине запрещенной зоны состояния донорного типа нейтральны. Если же уровень Ферми находится вблизи валентной зоны, то все уровни в запрещенной зоне свободны и акцепторные состояния в верхней половине запрещенной зоны нейтральны, а донорные заряжены положительно. При рассмотрении инжекции неосновных носителей в базу мы считаем, что заряд на поверхностных состояниях создается только инжектированными носителями, т.е. заряжаются уровни поверхностных состояний, расположенные между уровнем середины запрещенной зоны и квазиуровнем Ферми для неосновных носителей. Зонные диаграммы границ раздела пассивирующего окисла и базовых областей pnp и npn транзисторов приведены на рис. 1.

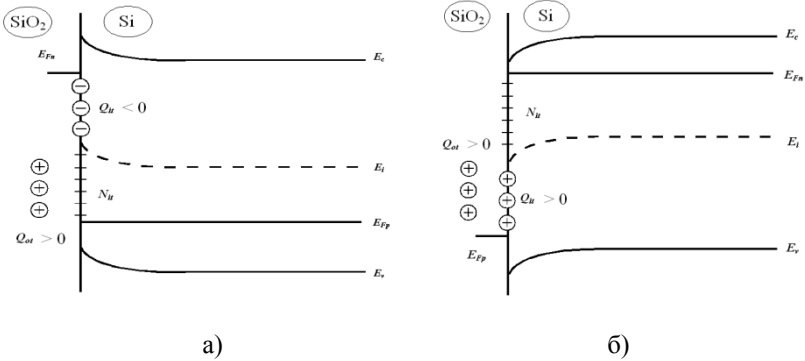


Рис. 1. Зонная диаграмма границы раздела пассивирующего окисла и р-базы ррп транзистора (а) и п-базы ррп транзистора (б) при прямом смещении эмиттерного перехода

Плотность тока поверхностной рекомбинации в ррп-транзисторе на единицу длины эмиттера получается интегрированием рекомбинационных потерь по всей длине W_S раздела пассивирующий окисел-база:

$$j_s = q \int_0^{W_S} U_s dy, \quad (1)$$

где q – заряд электрона; U_s - темп поверхностной рекомбинации; W_S – ширина поверхности пассивной области базы.

Уравнение (1) может быть переписано в виде:

$$\frac{dj_s}{dy} = qU_s. \quad (2)$$

Плотность тока поверхностной рекомбинации (на единицу длины) выражается через объемную плотность тока (на единицу площади) следующим образом:

$$j_s = \int_0^\infty j_V dx, \quad (3)$$

где j_V - объемная плотность тока.

Объемная плотность тока электронов может быть выражена через градиент концентрации инжектированных носителей n или градиент квазиуровня Ферми:

$$j_V = qD_n \frac{dn}{dy}, \quad (4)$$

где D_n – коэффициент диффузии электронов; μ_n - подвижность электронов в базе.

Комбинируя (2), (3) и (4), нетрудно получить

$$qD_n \frac{d^2}{dy^2} \int_0^\infty n dx = qU_s(n_s, p_s). \quad (5)$$

Поле, создаваемое зарядом поверхностных состояний, распространяется вглубь базы с характерной длиной, равной длине Дебая. Поэтому значение интеграла в левой части уравнения (5) в первом приближении можно считать равным произведению поверхностной концентрации электронов на длину Дебая $L_D = \sqrt{\frac{\varepsilon_{si}\varepsilon_0\varepsilon\varphi_T}{qN_A}}$, где n_s – концентрация электронов у поверхности раздела база-пассивирующий окисел; ε_0 – диэлектрическая постоянная; ε_{si} – диэлектрическая проницаемость кремния; φ_T – температурный потенциал; N_A – концентрация акцепторов в базе.

Скорость поверхностной рекомбинации U_s получается интегрированием вероятности рекомбинации по всем ловушкам в запрещенной зоне. С учетом того что, рекомбинация максимальна в тех областях, где концентрация носителей много больше равновесного значения, можно получить:

$$U_s = S_0 \frac{n_s p_s}{n_s + p_s} \ln\left(\frac{n_s + p_s}{n_i}\right), \quad (6)$$

где $S_0 = 2\sigma_{ts}v_T D_{it} kT$ – удельная скорость поверхностной рекомбинации, σ_{ts} – сечение захвата носителя ловушкой; v_T – тепловая скорость носителей; D_{it} – плотность поверхностных состояний на границе раздела пассивирующий окисел-база; n_s – собственная концентрация носителей.

Поверхностная концентрация электронов и дырок получается из граничного условия Шокли:

$$n_s = \frac{n_i^2}{N_A} \exp\left(\frac{U}{\varphi_T}\right) \exp\left(-\frac{\varphi_s}{\varphi_T}\right), \quad (7)$$

$$p_s = N_A \exp\left(\frac{\varphi_s}{\varphi_T}\right). \quad (8)$$

Для малого уровня инжекции ($n_s \ll p_s$) соотношение (6) преобразуется к виду

$$U_s = S_0 \frac{\varphi_s + \varphi_F}{\varphi_T} n_s. \quad (9)$$

Подставляя (9) в (5) и вводя понятие поверхностной диффузионной длины $L_s = \sqrt{\frac{D_n L_D \varphi_T}{S_0 (\varphi_F + \varphi_s)}}$, получаем дифференциальное уравнение для поверхностной концентрации электронов:

$$\frac{d^2 n_s}{dy^2} - \frac{1}{L_s^2} n_s = 0. \quad (10)$$

Связь между поверхностным потенциалом и зарядом поверхностных состояний находится из соотношения:

$$Q_{it} = \pm \frac{\sqrt{2}\varepsilon_{si}\varepsilon_0\varphi_T}{L_D} \sqrt{\left(\exp\left(-\frac{\varphi_s}{\varphi_T}\right) - \frac{\varphi_s}{\varphi_T} - 1\right) + \frac{n_i^2}{N_A^2} \left(\exp\left(\frac{\varphi_s}{\varphi_T}\right) + \frac{\varphi_s}{\varphi_T} - 1\right)}. \quad (11)$$

Заряд поверхностных состояний, как следует из рис.1а, записывается для прп транзисторов в форме:

$$Q_{it} = -qD_{it}(U - \varphi_F - \varphi_s), \quad (12)$$

где φ_F – потенциал Ферми в базе; φ_s – модуль поверхностного потенциала. Приравнявая (11) и (12), получаем трансцендентное уравнение, устанавливающее связь поверхностного потенциала и текущего значения разницы квазиуровней Ферми U .

Решая уравнение (10) с граничными условиями $n_s(0) = n_{s0}$ и $\frac{dn_s}{dy} \Big|_{y=W_s} = 0$ с учетом зависимости $\varphi_s(D_{it})$, полученной из (11) и (12), используя соотношения (1) и (9), можно найти удельный ток поверхностной рекомбинации

$$j_s = -qD_n L_D n_{s0} \frac{1 - \exp(2W_s/L_s)}{L_s 1 + \exp(2W_s/L_s)}. \quad (13)$$

Зависимости плотности тока поверхностной рекомбинации от плотности поверхностных состояний при уровне легирования базы $N_a = 1,0 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ при разных смещениях эмиттерного перехода, рассчитанные по формуле (13), представлены на рис.2.

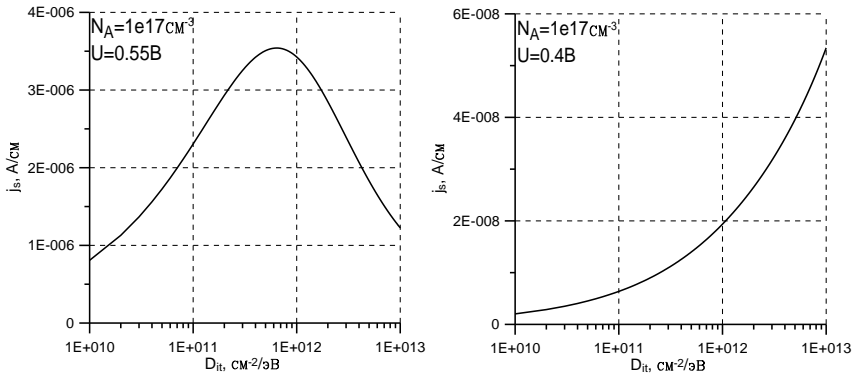


Рис. 2. Зависимость удельного тока поверхностной рекомбинации от плотности поверхностных состояний

Анализ тока поверхностной рекомбинации, проведенный в данной главе, показал, что ток базы биполярных транзисторов является сложной функцией плотности поверхностных состояний. Полученная зависимость, в общем случае, не является ни линейной, ни монотонной. Факт немонотонности является следствием влияния заряда поверхностных состояний на концентрацию неосновных носителей в приповерхностных областях баз биполярных транзисторов, что приводит к снижению темпа поверхностной рекомбинации при увеличении плотности поверхностных состояний под действием облучения. По данным расчетов этот эффект наблюдается при больших значениях N_{it} (порядка 10^{12} см^{-2}) и больших значениях прямого смещения эмиттерного перехода. Однако, при малых значениях N_{it} зависимость тока поверхностной рекомбинации от плотности поверхност-

ных состояний можно считать линейной с достаточной точностью. Таким образом, для того, чтобы избежать появления в разрабатываемой модели эффекта низкой интенсивности дополнительных параметров, необходимых для учета нелинейности тока поверхностной рекомбинации как функции плотности поверхностных состояний, эксперименты и расчеты следует проводить при малых уровнях поглощенных доз.

3. Конверсионная модель накопления поверхностных состояний

Существуют две наиболее известные модели встраивания поверхностных состояний: водородная и конверсионная. В основу данной работы положена конверсионная модель, предполагающая, что встраивание поверхностных состояний происходит при нейтрализации положительного заряда в окисле электронами из полупроводника, т.е. за счет конверсии положительного заряда в поверхностные состояния. В этом процессе участвуют ловушки положительного заряда, энергетические уровни которых располагаются в окисле напротив запрещенной зоны кремния. Термическая вибрация решетки приводит к спонтанному изменению энергии ловушек. При этом, если энергия ловушки достигает уровня зоны проводимости, появляется возможность взаимодействия положительного заряда на ловушках с электронами, туннелирующими из кремниевой подложки. Описанный механизм конверсии представлен на рис.3а.

Вероятность возбуждения энергии ловушки до уровня зоны проводимости зависит от глубины залегания ловушки напротив запрещенной зоны кремния. Чем глубже залегает ловушка (относительно уровня зоны проводимости), тем менее вероятен процесс конверсии. Во временном масштабе сначала отжигаются мелкие ловушки (вблизи уровня зоны проводимости), а затем фронт отжига по энергии распространяется на более глубокие ловушки, залегающие напротив середины запрещенной зоны кремния.

Если бы распределение плотности дырочных ловушек в запрещенной зоне SiO_2 было непрерывным, то наблюдался бы непрерывный рост плотности поверхностных состояний и, следовательно, непрерывное увеличение тока базы при уменьшении мощности дозы облучения, даже при высоких мощностях. Однако экспериментальные данные показывают, что при высоких интенсивностях приращение тока базы от интенсивности не зависит. Изложенные результаты позволяют предположить, что эффект низкой интенсивности может быть связан с конверсией двух групп ловушек: группы мелких ловушек с малым временем конверсии, ответственных за деградацию при высоких интенсивностях, и группы глубоких ловушек, определяющих возрастание тока базы при больших временах облучения, т.е. при малых интенсивностях. Данная концепция представлена на рис.3б.

Результаты расчета тока поверхностной рекомбинации, проведенного в главе 2, представленные на рис.2, позволяют заключить, что зависимость плотности тока поверхностной рекомбинации от плотности поверхностных состояний N_{it} в диапазоне значений ($10^{10} \text{ см}^{-2} - 10^{12} \text{ см}^{-2}$) с достаточной степенью точностью можно считать линейной. Существуют работы, в которых экспериментально установлено, что значение N_{it} при облучении в широком диапазоне интенсивностей находится в пределах $10^{11} \text{ см}^{-2} - 10^{12} \text{ см}^{-2}$ при дозе 200 крад(Si). В условиях космического пространства для накопления такого уровня поглощенной дозы требуется около семи лет. Таким образом, можно считать, что при воздействии космического излучения и полных дозах, не превышающих 200 крад(Si) приращение базового тока биполярного транзистора прямо пропорционально приращению плотности поверхностных состояний.

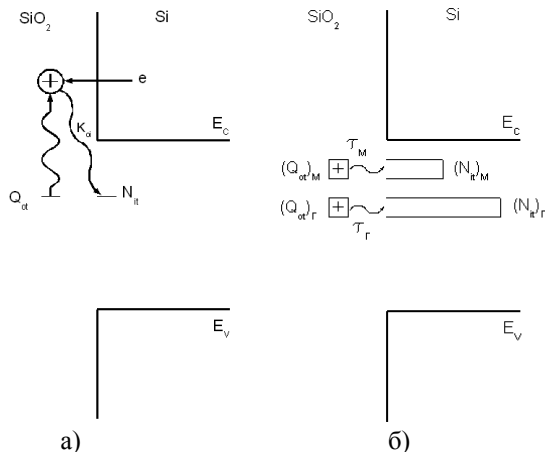


Рис.3. Энергетическая диаграмма границы раздела окисел-полупроводник ($\text{SiO}_2\text{-Si}$), иллюстрирующая конверсию положительного заряда захваченных дырок Q_{ot} в поверхностные состояния (а). Две группы ловушек положительного заряда в окисле (б)

Исходя из предположения, что конверсия мелких ловушек происходит по экспоненциальному закону с постоянной времени τ_r , а мелкие ловушки преобразуются в поверхностные состояния практически мгновенно, зависимость радиационной деградации от интенсивности γ выражается соотношением:

$$\Delta I_{\beta} = (K_{\Gamma} + K_M)D + K_{\Gamma}\gamma\tau_{\Gamma} \left(\exp\left(-\frac{D}{\gamma\tau_{\Gamma}}\right) - 1 \right), \quad (14)$$

где K_M и K_{Γ} – коэффициенты пропорциональности приращения базового тока и поглощенной дозы D при высокой и низкой интенсивностях соот-

ответственно, τ_T – постоянная времени конверсии глубоких ловушек, γ - интенсивность излучения.

На рис. 4 показаны экспериментальные и расчетные, полученные с использованием формулы (14), зависимости приращения тока базы от интенсивности облучения. Расчет хорошо согласуется с экспериментом при значениях подстроечных коэффициентов, сведенных в таблицу 1. В литературе приведены экспериментальные данные по изменению тока базы после прекращения высокоинтенсивного облучения. Получено, что на этапе послерадиационного отжига ток базы начинает возрастать, начиная с времен порядка 10^5 с. В рамках предлагаемой конверсионной модели это объясняется тем, что заряд глубоких ловушек, накопленный за короткое время высокоинтенсивного облучения, не успевает конвертироваться в поверхностные состояния. Конверсия заряда происходит с постоянной времени τ_T только на этапе отжига. Эта постоянная для приборов, как следует из таблицы 1, равна $3 \cdot 10^5$ с, что соответствует экспериментальному значению времени начала возрастания тока базы после прекращения высокоинтенсивного облучения.

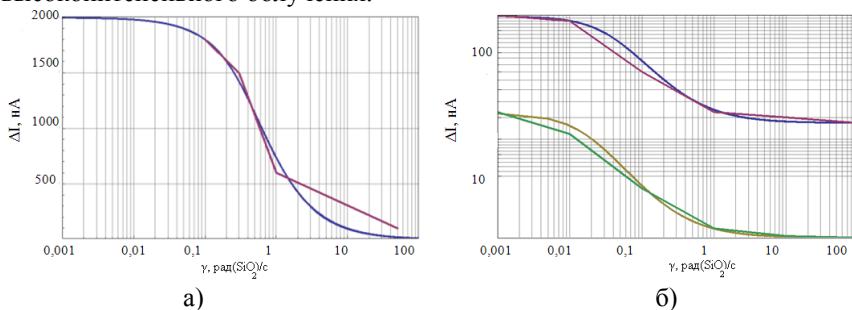


Рис.4. Экспериментальные и расчетные зависимости радиационной деградации компаратора LM111(а) и рnp транзисторов (б)

Таблица 1. Экспериментальные значения подстроечных коэффициентов.

		K_M мкА/рад(SiO ₂)	K_D мкА/рад(SiO ₂)	τ_T ,с
рnp	боковые	$135 \cdot 10^{-5}$	$865 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^5$
	подложечные	$16 \cdot 10^{-5}$	$149 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^5$
компаратор LM111		$33,3 \cdot 10^{-5}$	$633 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^5$

Предложенная модель имеет три подстроечных коэффициента: K_m , K_r и τ_r . Коэффициент K_m , равный приращению тока базы на единицу поглощенной дозы при воздействии излучения высокой интенсивности, легко измеряется экспериментально. Для получения коэффициента τ_r , характеризующего временной диапазон эффекта низкой интенсивности (диапазон интенсивностей, где наблюдается рост приращения тока базы), можно использовать эффект послерадиационного отжига. Как будет показано далее, для экстракции коэффициента K_r требуется облучение при повышенной температуре.

4. Методика измерения электрических параметров полупроводниковых приборов. Измерительная аппаратура

В данной главе представлено автоматизированное устройство предназначенное, для измерения электрических характеристик интегральных микросхем и дискретных полупроводниковых приборов. Рассмотрена методика измерения токов с помощью диодного логарифмического преобразователя ток-напряжение, описан алгоритм калибровки преобразователя с использованием резисторов различных номиналов, приведены передаточные характеристики трех измерительных каналов устройства. Данная методика позволяет измерять токи в широком диапазоне от 10^{-2} А до 10^{-10} А с относительной погрешностью не более 1%. Представлена методика калибровки цифроаналоговых преобразователей, позволяющая снизить более чем на порядок дифференциальную нелинейность преобразования и достичь точности задания напряжения ± 1 мВ в диапазоне ± 10 В. Для сравнения приведены характеристики точности задания напряжения до и после калибровки. Приведены термодинамические характеристики интегрированной в измерительное устройство системы термостабилизации. Показано, что данная система позволяет обеспечивать стабилизацию температуры с точностью $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Описана полная структурная схема устройства для автоматизации измерения характеристик интегральных микросхем и дискретных приборов при экспериментах и квалификационных испытаниях.

Имеющиеся на рынке измерительные системы с аналогичными электрическими характеристиками имеют стоимость на порядок и более, превышающую стоимость разработанного устройства. При использовании данных приборов необходимо собирать громоздкие стенды и решать вопросы электрической совместимости для достижения необходимой точности результатов измерений. Также необходимо использовать дополнительные внешние модули термостабилизации и разрабатывать коммутационное оборудование. Представленная измерительная система, обладая компактными размерами, сочетает в себе все описанные выше возможности.

5. Экспериментальные исследования радиационной деградации биполярных приборов

Для разработки методики радиационных испытаний необходимо определить электрические параметры операционных усилителей (ОУ) и компараторов напряжения (КН), изменяющиеся под действием ИИ, а так же разработать методику измерения выбранных параметров.

На основе анализа литературных данных по радиационным испытаниям установлено, что для широко распространенных высокопроизводительных ОУ характерна сильная радиационная деградация входных токов и напряжения смещения нуля, в то время как коэффициент усиления дифференциального сигнала меняется незначительно. Воздействие ИИ вызывает так же и изменение тока потребления ОУ, которые менее существенны, чем изменения входных параметров, но представляют интерес с точки зрения диагностики причин радиационной деградации ОУ. Изменения скорости нарастания выходного напряжения ОУ при радиационном воздействии носят принципиально иной характер. С увеличением уровня поглощенной дозы скорость нарастания снижается, т.е. данный параметр ОУ улучшается при воздействии ИИ. Этот факт объясняется уменьшением времени жизни неосновных носителей заряда в областях баз биполярных транзисторов, входящих в состав ОУ, что приводит к увеличению скорости рекомбинации и улучшению частотных характеристик как отдельных транзисторов, так и ОУ в целом.

С точки зрения разработчиков прецизионной РЭА, предназначенной для применения в условиях воздействия ИИ, наибольший интерес представляет радиационная деградация напряжения смещения нуля, в то время как параметры типовых схем включения ОУ (инвертирующего усилителя, неинвертирующего усилителя и повторителя) менее чувствительны к изменениям входных токов смещения и токов потребления ОУ. Однако эти изменения являются хорошим индикатором радиационной деградации ОУ и помогают определить ее причины с целью принятия технологических и схемотехнических мер по повышению радиационной стойкости ОУ. Экспериментальные исследования, проведенные в данной работе, показали, что существует много типов биполярных микросхем широкого применения, радиационная деградация которых не зависит от мощности дозы и определяется только полной поглощенной дозой. Для исследований выбрано шесть типов биполярных приборов: два типа операционных усилителей LM124 (TI), LM101A (NS), три типа дискретных транзисторов 2N2222 (NS), 2N2907 (NS), BC817 (NS), компаратор LM111 (TI). В результате исследований установлено, что увеличение темпа радиационной деградации при уменьшении мощности дозы характерно только для компараторов LM111 (рис.5а). В дискретных транзисторах 2N2222, 2N2907,

BC817 наблюдался обратный эффект, а темп радиационной деградации LM101A и LM124 от мощности дозы не зависел. Таким образом, для корректной оценки радиационной стойкости ИМС, актуальной становится задача выявления типов полупроводниковых приборов, в которых отсутствует эффект низкой интенсивности без использования долговременного низкоинтенсивного облучения.

Образы приборов всех типов облучались при трех значениях мощностей доз: 10 рад(SiO_2)/с, 0,015 рад(SiO_2)/с и 0,003 рад(SiO_2)/с. После высокоинтенсивного облучения (10 рад(SiO_2)/с) приборы выдерживались при температуре 25 $^{\circ}\text{C}$ в течение шести месяцев. В отличие от остальных приборов, отжиг компаратора LM111 приводит к дальнейшему увеличению радиационной деградации (рис.5б). Таким образом, в результате проведенных исследований, установлено, что существует корреляция зависимости радиационной деградации от мощности дозы и характера послерадиационного отжига.

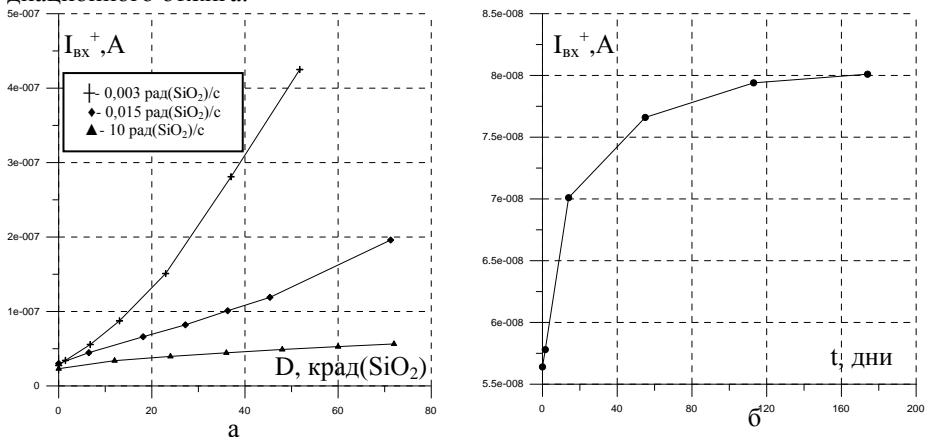


Рис.5. Дозовая зависимость радиационной деградации входного тока компаратора LM111 при разных интенсивностях облучения (а) послерадиационный отжиг (25 $^{\circ}\text{C}$) (б)

Дальнейшее увеличение радиационной деградации при послерадиационном отжиге связано с преобразованием накопленных в окисле на этапе облучения глубоких ловушек в поверхностные состояния, что является прямым следствием конверсионной модели эффекта низкой интенсивности, положенной в основу данной работы.

Ряд методик экстракции требует использования облучения при повышенной температуре. Для реализации этой возможности разработана методика дистанционного нагрева микросхем с возможностью контроля температуры кристалла по р-п переходу. В качестве нагревательных эле-

ментов используются биполярные pnp транзисторы BCX51, имеющие хороший тепловой контакт с датчиком температуры LM335 и располагающиеся на одной плате с облучаемой микросхемой.

Данная методика использовалась при высокотемпературном облучении компараторов LM111. Вольтамперная характеристика контрольного p-n перехода при облучении изменялась незначительно, что позволило достичь точности задания температуры в диапазоне 25°C - 125°C на уровне $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ при максимальной поглощенной дозе $60 \text{ крад}(\text{SiO}_2)$. Зависимости температуры датчика и кристалла микросхемы от времени при нагреве и остывании приведены на рис.6а. Дозовые зависимости радиационной деградации входных токов компаратора LM111 при различных температурах облучения приведены на рис.6б.

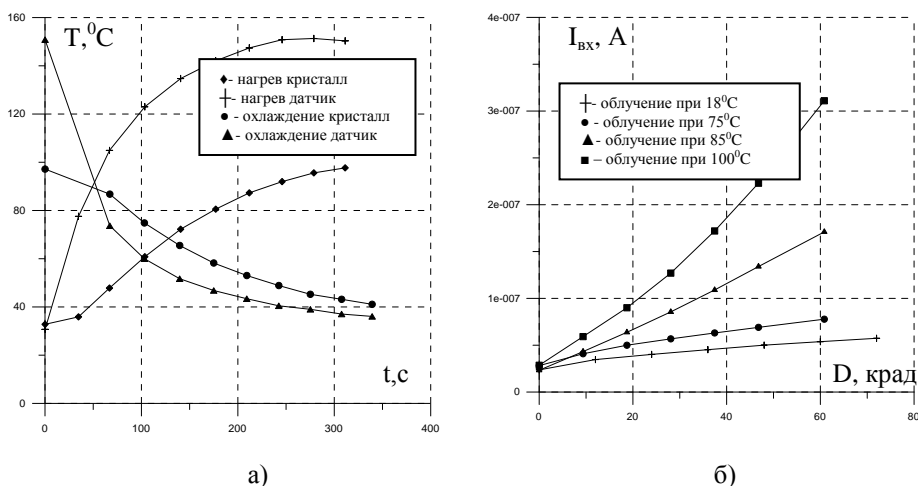


Рис.6. Зависимости температуры датчика и кристалла микросхемы от времени при нагреве и остывании(а), дозовые зависимости радиационной деградации входного тока компаратора LM111 при различных температурах облучения (б)

6. Экстракция параметров конверсионной модели эффекта низкой интенсивности.

Конверсионная модель эффекта позволяет в простой аналитической форме описать деградацию тока базы биполярного транзистора при любой суммарной поглощенной дозе, интенсивности и температуре облучения, что открывает возможности построения на ее основе простых и достоверных методик прогнозирования. В данной главе описана методика экстракции параметров конверсионной модели из эксперимента. Описан-

ная методика опробована на примере компаратора LM111 с использованием результатов экспериментов, описанных в предыдущей главе.

Конверсионная модель имеет три подстроечных параметра:

1. K_r - коэффициент, характеризующий приращение тока базы за счет конверсии глубоких ловушек и равный приращению тока базы на единицу поглощенной дозы при низкой интенсивности;
2. K_m - коэффициент, характеризующий приращение тока базы за счет конверсии мелких ловушек и равный приращению тока базы на единицу поглощенной дозы при высокой интенсивности;
3. τ_r - время конверсии глубоких ловушек.

В математической форме зависимость радиационной деградации от интенсивности ионизирующего излучения описывается соотношением (14). Знание этих параметров позволяет рассчитать полную инверсную S-образную характеристику и прогнозировать деградацию тока базы для любой заданной интенсивности и суммарной накопленной дозе облучения. Для экстракции подстроечных параметров используется

- высокоинтенсивное облучение для определения коэффициента K_m , пропорционального концентрации мелких ловушек;
- высокотемпературный послерадиационный отжиг для определения постоянной конверсии глубоких ловушек τ_r ;
- облучение при высокой температуре для определения коэффициента K_r , пропорционального концентрации глубоких ловушек.

Для экстракции K_m исследуемый прибор облучается при высокой интенсивности $3 \div 30$ рад/с при комнатной температуре. Радиационно-индуцированное приращение тока базы должно составлять примерно 50% от исходного значения тока базы. Измеряется приращение тока $(\Delta I_6)_{B.H.}$. Коэффициент K_m вычисляется по формуле:

$$K_m = (\Delta I_6)_{B.H.} / D, \quad (15)$$

где $(\Delta I_6)_{B.H.}$ - приращение тока базы при воздействии высокой интенсивности, D - поглощенная доза.

Предполагая, что зависимость постоянной времени процесса отжига от температуры описывается законом Аррениуса, можно записать:

$$\tau_r = \tau_{r0} \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right), \quad (16)$$

где τ_{r0} - предэкспоненциальный множитель, E_a - энергия активации процесса отжига глубоких ловушек, k - постоянная Больцмана, T - температура. Предэкспоненциальный множитель τ_{r0} и энергия активации E_a в (16) могут быть получены из данных по отжигу при двух различных температурах. Для этого снимается зависимость изменения тока базы от времени для каждой температуры и определяются постоянные времени этого процесса $(\tau_r)_{T1}$ и $(\tau_r)_{T2}$, считая, что изменение тока базы от времени носит

экспоненциальный характер. Коэффициенты τ_{r0} и E_a определяются по формулам:

$$\tau_{r0} = (\tau_r)_{T1} / \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right), \quad (17a)$$

$$E_a = \frac{kT_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{(\tau_r)_{T1}}{(\tau_r)_{T2}}. \quad (17б)$$

Описанный подход позволяет экстрагировать постоянную времени конверсии глубоких ловушек для любой температуры во время облучения.

Процесс конверсии, как было отмечено выше, действует, как своеобразный «насос», непрерывно перекачивающий радиационно-индуцированный положительный заряд захваченных дырок в поверхностные состояния. Поверхностные состояния образуются лишь за счет конверсии заряда, расположенного на расстоянии 1-2 монослоя от границы раздела. Однако при высокоинтенсивном облучении захваченный заряд может быть пространственно распределен по глубине окисла, в результате чего в поверхностные состояния конвертируется лишь незначительная часть заряда захваченных на ловушки дырок. Это может быть связано с эффектом пространственного заряда при высокоинтенсивном облучении. Положительный заряд, захваченных в окисле дырок у границы раздела $\text{SiO}_2\text{-Si}$, создает электрическое поле, препятствующее дальнейшему накоплению захваченных дырок непосредственно около границы раздела. Поэтому захваченные дырки пространственно распределены по глубине окисла на расстоянии до десятка монослоев. При низкоинтенсивном облучении захваченный заряд непрерывно конвертируется в поверхностные состояния и эффект пространственного заряда отсутствует. Указанное обстоятельство делает невозможной оценку количества накопленных глубоких ловушек и извлечение параметра K_G непосредственно после высокоинтенсивного облучения. Для экстракции K_G необходимы условия, когда весь заряд глубоких ловушек участвует в процессе отжига. Поэтому предлагается использовать высокоинтенсивное облучение при повышенной температуре, когда за время облучения отжигается весь накопленный заряд.

Для экстракции параметра K_G облучение проводится при повышенной температуре T_b (например, 100°C) и высокой интенсивности $3\div 30$ рад(SiO_2)/с. Транзистор облучается до накопленной дозы, когда приращение тока базы составляет примерно 50% от исходного значения. Коэффициент K_G вычисляется с использованием формулы (14), где левая часть соответствует экспериментальному значению изменения тока базы, а коэффициент τ_r вычисляется для температуры T_b по формуле (16) с использованием величин τ_{r0} и E_a (формулы 17a и 17б).

По экспериментальным данным, полученным при послерadiационном отжиге при температурах 90°C и 75°C , были определены параметры

конверсионной модели E_a и τ_{r0} , а так же соответствующие параметры отжига без конверсии. Результаты экстракции приведены в таблице 2. На рис.7а и рис.7б представлены расчетные и экспериментальные зависимости входного тока при послерадиационном отжиге для температур 90°C , 75°C , 25°C .

Таблица.2. Параметры конверсионной модели, полученные из послерадиационного отжига.

	Отжиг с конверсией, τ_r , с	Отжиг без конверсии, τ_r , с
25°C	$4,47 \cdot 10^6$	$1,48 \cdot 10^4$
75°C	$4,32 \cdot 10^4$	$1,40 \cdot 10^3$
90°C	$1,38 \cdot 10^4$	$7,18 \cdot 10^2$
Параметры отжига		
E_a , эВ	0,83	0,49
τ_{r0} , с	$4,30 \cdot 10^{-8}$	$1,15 \cdot 10^{-4}$

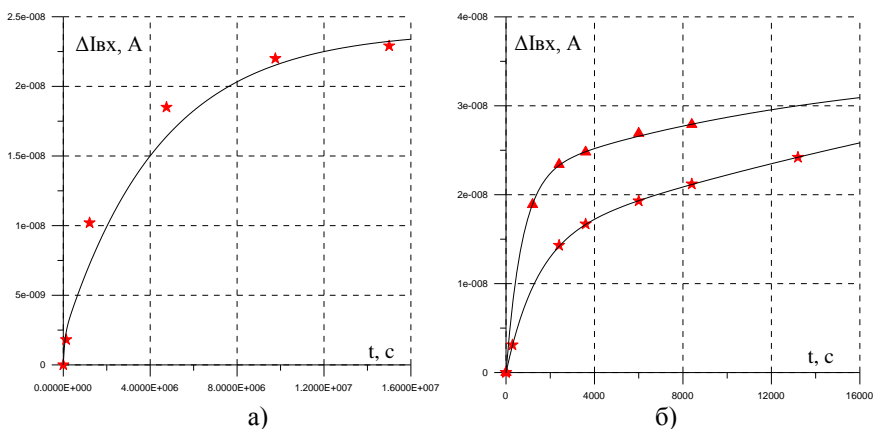


Рис.7. Расчетные и экспериментальные зависимости входного тока при послерадиационном отжиге для температур 25°C (а), 75°C ★, 90°C ★ (б)

Постоянная времени конверсии глубоких ловушек при 18°C равна $\tau_r(18^{\circ}\text{C}) = 9,70 \cdot 10^6$, при 100°C $\tau_r(100^{\circ}\text{C}) = 6,78 \cdot 10^3$. По результатам высокотемпературного облучения были получены значения K_r и K_m . Результаты расчетов представлены в таблице 3.

Таблица 3. Значения K_G и K_M полученные из высокотемпературного облучения.

Температура при облучении, $^{\circ}\text{C}$	$K_G, \text{A/рад}$	$K_M, \text{A/рад}$
100	$1,55 \cdot 10^{-11}$	$6,6 \cdot 10^{-13}$
90	$1,53 \cdot 10^{-11}$	$6,6 \cdot 10^{-13}$
75	$1,52 \cdot 10^{-11}$	$6,6 \cdot 10^{-13}$

С использованием полученных параметров конверсионной модели были рассчитаны дозовые зависимости радиационной деградации входных токов LM111 для трех интенсивностей 10 рад/с, 0,015 рад/с и 0,0028 рад/с. Расчетные зависимости с соответствующими экспериментальными результатами представлены на рис.8.

Параметры конверсионной модели можно извлечь без использования эффекта послерадиационного отжига, только из экспериментов по высокотемпературному облучению. Для экстракции параметров модели (E_a , τ_{r0} , K_G , K_M) из облучения при повышенной температуре необходимо иметь данные по радиационной деградации исследуемого прибора при постоянной полной дозе для четырех значений температур при облучении (включая облучение при комнатной температуре). Описанный подход с использованием результатов экспериментов по высокотемпературному облучению компараторов LM111 при температурах 25°C , 75°C , 90°C и 100°C , дает следующие значения параметров модели:

$$K_G = 1,40 \cdot 10^{-11} \text{ A/рад}, K_M = 6,6 \cdot 10^{-13} \text{ A/рад}, \tau_{r0} = 3,74 \cdot 10^{-8} \text{ с}, E_a = 0,83 \text{ эВ}$$

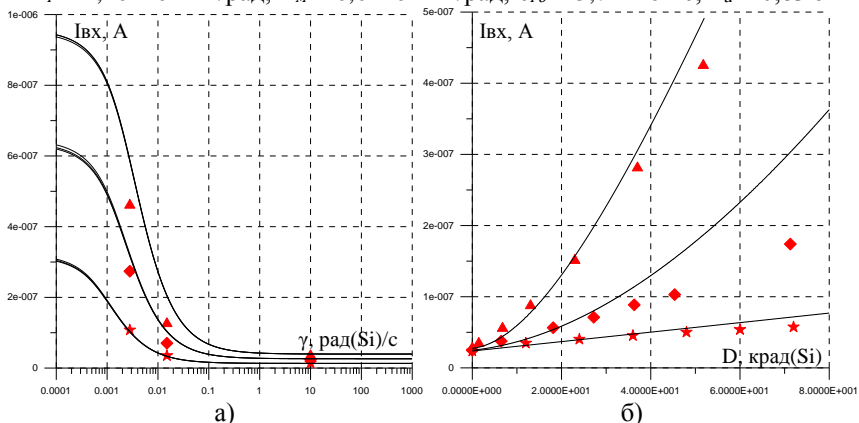


Рис.8. Расчетные и экспериментальные зависимости радиационной деградации входного тока LM111 от интенсивности для доз 20крад, 40крад, 60крад (а) и дозы для интенсивностей 10рад/с, 0,015рад/с, 0,0028 рад/с (б) облучения

На рис.9а представлены экспериментальные точки и расчетная зависимость радиационной деградации входного тока LM111 от температуры облучения. По полученным данным рассчитана постоянная времени при температуре низкоинтенсивного облучения $\tau_r(18^{\circ}\text{C}) = 8,6 \cdot 10^6$ с. Зависимость деградации от интенсивности облучения полученная по параметрам определенным из высокотемпературного облучения представлена на рис.9б и хорошо согласуется с экспериментальными данными.

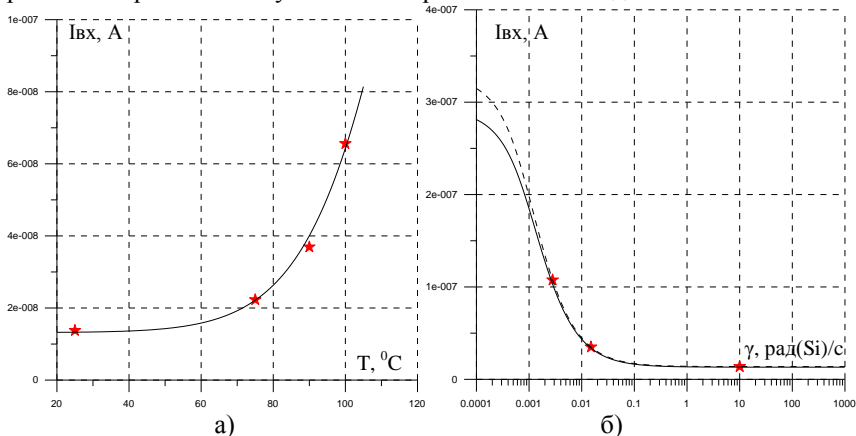


Рис.9 Зависимость деградации от температуры (а) и интенсивности (б) излучения, полученная по параметрам определенным из высокотемпературного облучения. Пунктирная кривая построена по параметрам, полученным из облучения при трех разных интенсивностях при температуре 18°C

Для сравнения двух использованных методик экстракции параметров конверсионной модели значения K_r , K_M и $\tau_r(18^{\circ}\text{C})$ были определены из облучения при трех разных интенсивностях при температуре 18°C . В таблице 4 приведены значения этих же параметров полученных с использованием послерадиационного отжига и без применения отжига.

Таблица 4. Значения параметров конверсионной модели, полученные с использованием и без использования послерадиационного отжига.

	K_r , А/рад	K_M , А/рад	τ_r , с
Три интенсивности	$1,58 \cdot 10^{-11}$	$6,6 \cdot 10^{-13}$	$9,5 \cdot 10^6$
Отжиг	$1,55 \cdot 10^{-11}$	$6,6 \cdot 10^{-13}$	$9,7 \cdot 10^6$
Четыре температуры	$1,40 \cdot 10^{-11}$	$6,6 \cdot 10^{-13}$	$8,6 \cdot 10^6$

Применение методики экстракции параметров конверсионной модели с использованием послерадиационного отжига дает лучшее совпадение расчетных и экспериментальных данных. Методика с отжигом техни-

чески проще, поскольку предполагается облучение только при одном значении повышенной температуры, в отличие от методики без использования отжига, предусматривающей облучение при трех различных повышенных температурах.

Экстракция параметров конверсионной модели позволяет получить полное описание S-образной зависимости деградации тока базы от интенсивности при заданной накопленной дозе. Используя S-образную характеристику можно прогнозировать деградацию коэффициента усиления биполярных приборов при любой заданной интенсивности, соответствующей функционированию приборов в реальных условиях.

Заключение

Основной научный результат диссертации:

Разработана физическая модель эффекта низкой интенсивности в биполярных микросхемах и методика экстракции параметров модели, позволяющая оценивать радиационную деградацию биполярных приборов при заданной поглощенной дозе и интенсивности облучения.

Основные теоретические результаты:

1. Получена зависимость тока поверхностной рекомбинации биполярных транзисторных структур от плотности поверхностных состояний, позволяющая связать деградацию радиационно-чувствительных параметров биполярных приборов с поглощенной дозой.
2. Предложена конверсионная модель эффекта низкой интенсивности.
3. Предложена методика экстракции параметров конверсионной модели.

Основной практический результат:

На основе установленной корреляции наличия эффекта низкой интенсивности и дальнейшей деградации при послерадиационном отжиге разработана методика выявления эффекта низкой интенсивности в биполярных микросхемах и дискретных приборах.

Частные практические результаты:

1. Разработано устройство для измерения радиационно-чувствительных параметров полупроводниковых приборов, позволяющее проводить экспериментальную экстракцию параметров конверсионной модели. Использование данного устройства внедрено в лабораторный практикум «Физика микроэлектронных структур» кафедры Нано- и микроэлектроники НИЯУ МИФИ.
2. Разработаны методики измерения радиационно-чувствительных параметров операционных усилителей, компараторов и дискретных транзисторов. Разработанные методики внедрены в «ФГУП НИИП» г. Лыткарино.
3. Разработана методика задания и контроля температуры кристаллов ИМС при экспериментах по экстракции параметров конверсионной модели.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Д.В. Савченков, А.С. Бакеренков, А.С. Егоров, В.С. Першенков. Ток поверхностной рекомбинации в биполярных микроэлектронных структурах при воздействии ионизирующего излучения. // Вопросы атомной науки и техники, серия Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, научно-технический сборник, выпуск 1, Москва, 2008, стр.53-54.
2. В.С. Першенков, Д.В. Савченков, А.С. Бакеренков, А.С. Егоров,. Расчет тока поверхностной рекомбинации в биполярных микроэлектронных структурах при воздействии ионизирующего излучения. // Микроэлектроника. - 2009. - Том 38, N 1. - С. 21-33.
3. А.С. Бакеренков, В.В. Беляков, В.В. Шуренков, А.М. Никитин, В.С. Першенков, Н.В. Варламов. Система для измерения параметров операционных усилителей при радиационном эксперименте. // Датчики и системы, 2011, №6, стр. 25-29.
4. А.С. Бакеренков, В.В. Беляков, Н.В. Варламов, А.М. Никитин, В.С. Першенков, В.В. Шуренков, Е.С. Волкодаев. Т.С. Ермоленко. Система задания и контроля температуры при экспериментах на циклотроне по исследованию одиночных сбоев в микросхемах. // Ядерная физика и инжиниринг, 2011, том 2, №6, стр. 502-509.
5. В.С. Першенков, Д.В. Савченков, А.С. Бакеренков, В.Н. Улимов. Конверсионная модель эффекта низкой интенсивности в биполярных микроэлектронных структурах при воздействии ионизирующего излучения. // Микроэлектроника. - 2010. - Том 39, N 2. - С. 102-112.
6. В.С. Першенков, А.С. Бакеренков, С.А. Варламов, В.В. Беляков, В.А.Лапшинский. Расчетный метод оценки стойкости биполярных приборов к воздействию ионизирующих излучений низкой интенсивности и использование конверсионной модели. // Вопросы атомной науки и техники выпуск 4, 2011 г, стр. 5-12.
7. А.С. Бакеренков, В.В. Беляков, В.С. Першенков, А.А. Романенко, Д.В. Савченков, В.В. Шуренков. Экстракция подстроечных параметров конверсионной модели эффекта низкой интенсивности в биполярных приборах. // Микроэлектроника. - 2012. - Том 41. N 6. С. 445-449.
8. А.С. Бакеренков, В.В. Беляков, В.А. Лапшинский, В.С. Першенков, А.В. Соломатин. Прибор для измерения электрических характеристик электронных компонентов. // Датчики и системы, 2012, №11, стр. 30-35.

Статьи и материалы конференций

1. А.С. Бакеренков, Д.В. Савченков, А.С. Егоров, В.С. Першенков. Моделирование эффекта низкой интенсивности в биполярных приборах, Радиационная стойкость электронных систем. // «Стойкость - 2008», научно-технический сборник, выпуск 11, Москва 2008, стр. 121-122.
2. Д.В. Савченков, А.С. Бакеренков, А.С. Егоров, В.С. Першенков. Ток поверхностной рекомбинации в биполярных микроэлектронных структурах при воздействии ионизирующего излучения. // Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость - 2008», научно-технический сборник, выпуск 11, Москва 2008, стр. 226-228.
3. В.С. Першенков, Д.В. Савченков, А.С. Бакеренков, И.Н. Абраменко. Эффект радиационного отжига при циклическом облучении биполярных структур. // Научная сессия МИФИ-2009, аннотация докладов, том 2, с. 70.
4. В.С. Першенков, Д.В. Савченков, А.С. Бакеренков, И.Н. Абраменко. S-образная модель эффекта низкой интенсивности в биполярных микроэлектронных структурах. // Научная сессия МИФИ-2009, аннотация докладов, том 2, с. 70.
5. Д.В. Савченков, А.С. Бакеренков, В.С. Першенков. Конверсионная модель эффекта низкой интенсивности в биполярных транзисторах. // Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость - 2009», научно-технический сборник, выпуск 12, Москва 2009, стр. 97-98.
6. V.S. Pershenkov, D.V. Savchenkov, A.S. Bakerenkov, V.N. Ulimov, A.Y. Nikiforov, A.I. Chumakov. The conversion model of low dose rate effect in bipolar transistors. // RADECS 2009.
7. Д.В. Савченков, А.С. Бакеренков, И.Н. Абраменко. Прогнозирование эффекта низкой интенсивности в биполярных микроэлектронных структурах. // VII Курчатовская молодежная научная школа 2009.
8. А.С. Бакеренков, Д.В. Савченков, И.Н. Абраменко. Универсальная автоматизированная система для измерения характеристик полупроводниковых приборов. // VII Курчатовская молодежная научная школа 2009.
9. А.С. Бакеренков, Д.В. Савченков, А.А. Лебедев, В.И. Русановский. Влияние электрического режима на деградацию параметров операционного усилителя LM124. // Труды научной сессии НИЯУ МИФИ-2010 стр. 258.
10. Д.В. Савченков, А.С. Бакеренков. Экстракция параметров конверсионной модели эффекта низкой интенсивности в биполярных

- транзисторах. // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2010, аннотации докладов том 2 стр. 101.
11. В.С. Першенков, Д.В. Савченков, А.С. Бакеренков. Экстракция параметров конверсионной модели эффекта низкой интенсивности в биполярных приборах. // «Стойкость - 2010», научно-технический сборник, выпуск 13, Москва 2010. стр. 77.
 12. А.С. Бакеренков, В.С. Першенков. Экспериментальное исследование влияния интенсивностей облучения и электрических режимов на радиационную деградацию биполярных операционных усилителей. // «Стойкость - 2010», научно-технический сборник, выпуск 13, Москва 2010. стр. 41.
 13. А.С. Бакеренков, А.А. Лебедев. Автоматизированная система для измерения электрических параметров операционных усилителей. // «Стойкость - 2010», научно-технический сборник, выпуск 13, Москва 2010 стр. 203.
 14. А.С. Бакеренков, Е.С. Волкодаев, А.Р. Евсеев, Т.С. Ермоленко. Система стабилизации температуры для испытаний ИМС на стойкость к воздействию тяжелых заряженных частиц. // «VIII Курчатовская молодежная научная школа», Сборник аннотаций работ, Москва 2010 стр. 79.
 15. А.С. Бакеренков, Е.С. Волкодаев, А.Р. Евсеев, Т.С. Ермоленко. Экстракция параметров конверсионной модели эффекта низкой интенсивности в биполярных ИМС. // «VIII Курчатовская молодежная научная школа», Сборник аннотаций работ, Москва 2010 стр. 79.
 16. А.С. Бакеренков Е.С. Волкодаев Т.С. Ермоленко А.Р. Евсеев. Система стабилизации температуры ИМС для испытаний на стойкость к воздействию ТЗЧ. // Научная сессия МИФИ-2011, аннотация докладов, том 1, с. 127.
 17. А.А. Лебедев А.Н. Пилипенко А.С. Бакеренков В.Д. Попов. Компьютерное моделирование радиационно-чувствительных характеристик операционного усилителя класса LM124. // Научная сессия МИФИ-2011, аннотация докладов, том 1, с. 136.
 18. Бакеренков А.С. Использование рентгеновского излучения для исследования радиационных эффектов в ИМС. // Радиационная стойкость электронных систем "Стойкость 2011" научно-технический сборник, стр. 185.
 19. А.С.Бакеренков, В.В.Беляков, Е.С.Волкодаев, Т.С.Ермоленко. Система задания и контроля температуры при экспериментах на циклотроне по исследованию одиночных сбоев в микросхемах. // Радиационная стойкость электронных систем "Стойкость 2011" научно-технический сборник, стр. 219.

20. A.Bakerenkov. The Fitting Parameters Extraction of Conversion Model of the Low Dose Rate Effect in Bipolar Devices. // International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering, Proceedings, pp 236-238.
21. А.С. Бакеренков, Е.С. Волкодаев, Т.С. Ермоленко, А.Р. Евсеев. Контроль температуры кристалла микросхемы при радиационных испытаниях. // Научная сессия МИФИ-2011, аннотация докладов, том 1, с. 127.
22. А.С. Бакеренков, А.Д. Ершова, С.А. Варламов, В.А. Фелицын, Т.Ю. Усманов. Методика выявления ELDRS в биполярных микросхемах. // IX Курчатовская молодежная научная школа, Сборник аннотаций, стр 143.
23. А.С. Бакеренков, В.В. Беляков, А.Р. Евсеев, В.С. Першенков, А.А. Романенко. Эффект низкой интенсивности в биполярных микроэлектронных структурах. // Сборник IX Межотраслевой конференции по радиационной стойкости, Снежинск, 2011, стр.138-144.

Подписано в печать: 12 марта 2013 г.

Заказ №8234 Тираж – 100 экз.
Печать трафаретная. Объем: 1 усл.п.л.
Типография «11-й ФОРМАТ»
ИНН 7726330900
115230, Москва, Варшавское ш., 36
(499) 788-78-56
www.autoreferat.ru