ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНОМИКИ»

КОЖУХОВ МАКСИМ ВЛАДИМИРОВИЧ

Разработка и исследование моделей радиационных воздействий для расчета характеристик кремниевых и кремний-германиевых биполярных транзисторов с помощью системы TCAD

> Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Специальность 05.13.12 «Системы автоматизации проектирования»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Петросянц Константин Орестович

г. Москва, 2016 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1 Современное состояние работ в области моделирования Si и SiGe биполярных транзисторных структур с учетом	
радиационных эффектов	14
1.1 Обзор современного состояния исследований в области приборно-технологического моделирования радиационных эффектов в структуре Si и SiGe биполярных транзисторов	14
1.2 Обзор современного состояния исследований в области разработки схемотехнических SPICE-моделей, учитывающих радиационные эффекты в Si и SiGe биполярных транзисторах	16
1.3 Выводы по главе 1	20
Глава 2 Приборно-технологические модели, учитывающие	
радиационные эффекты в структуре Si БT и SiGe ГБТ	22
2.1 TCAD модель электрофизических параметров, учитывающая влияние гамма- излучения в структурах Si БT и SiGe ГБТ	22
2.2 TCAD модель электрофизических параметров, учитывающая влияние нейтронного излучения в структурах Si БT и SiGe ГБТ	37
2.3 TCAD модель, учитывающая влияние структурных и ионизационных эффектов в структурах Si БT и SiGe ГБТ при воздействии протонов	50
2.4 Выводы по главе 2	63
Глава 3 Унифицированная SPICE-макромодель Si/SiGe биполярного	
транзистора, учитывающая влияние радиационных эффектов	65
3.1 Общий подход к разработке радиационных SPICE-моделей Si/SiGe БТ	65
3.2 Экстракция дополнительного набора радиационно-зависимых параметров унифицированной SPICE-макромодели Si/SiGe биполярных транзисторов	79
3.3 Выводы по главе 3	92
Глава 4 Применение разработанных ТСАД и SPICE моделей в практика проектирования Si БТ и SiCe ГБТ и фрагментов ИС и	
практике проектирования 51 D1 и 5100 Г D1 и фрагментов не и БИС, полвергнутых возлействию ралиании	93
4.1 Примеры сквозного TCAD-SPICE моделирования Si БТ и SiGe ГБТ при возлействии нейтронного излучения	
4.2 Оценка влияния поверхностных эффектов на радиационную стойкость СВЧ эпитаксиально-планарного n-p-n Si БТ 2Т391 при воздействии гамма- изпучения	108
4.3 Применение SPICE-RAD-модели для схемотехнического моделирования фрагментов ИС, подвергнутых воздействию различных видов радиации	113
4.4 Выводы по Главе 4	129
Заключение	. 131
Список использованной литературы	135

Введение

<u>Актуальность темы.</u> К электронным устройствам систем глобальной космической связи и телекоммуникаций, систем управления ядерными энергетическими установками, ракетно-космической, военной техники и др. предъявляются требования по радиационной стойкости к воздействию стационарных видов излучения и одиночных заряженных частиц (ОЯЧ). По оценкам зарубежных и отечественных специалистов, перспективной электронной компонентной базой (ЭКБ) для таких систем являются современные сверхвысокочастотные (СВЧ) кремний-германиевые транзисторы, которые помимо высоких усилительных свойств в диапазоне сотен гигагерц, обладают хорошей радиационной стойкостью к воздействию различных видов ионизирующих излучений.

Успешное решение задач проектирования и разработки радиационно-стойких кремниевых биполярных транзисторов (БТ) и кремний-германиевых гетеропереходных биполярных транзисторов (ГБТ), а также интегральных схем и систем на их основе невозможно без широкого применения систем автоматизированного проектирования (САПР). Важность такой проблемы ещё более возрастает в связи с имеющей место тенденцией к уменьшению размеров элементов, которые становятся все более чувствительными к факторам внешних воздействий, в частности, различных видов радиации¹.

Использование только экспериментальных подходов не позволяют оценить влияние радиационных эффектов до стадии их изготовления, т.е. на этапе разработки полупроводниковых приборов. В связи с этим, приобретает большое значение использование методов моделирования и проектирования с помощью САПР, которая может использоваться на двух уровнях: приборно-технологическом и схемотехническом. Наряду с этим в настоящее время все большее внимание получают методы сквозного моделирования, когда основными выходными данными приборно-технологического моделирования является параметры SPICE-модели, которые в дальнейшем используются для проектирования интегральных схем (ИС) и больших интегральных схем (БИС). Преимуществом сквозного моделирования является существенное сокращение временных и финансовых издержек при проектировании ЭКБ для аппаратуры специального назначения.

¹ Стемпковский А.Л. О некоторых проблемах при проектировании СБИС с наноразмерными компонентами. Нанотехнологии в электронике, вып. 3, 2015, с. 290-317.

Таким образом, одной из важнейших задач приборно-технологического (TCAD) и схемотехнического (SPICE) проектирования является создание математических моделей, учитывающих влияние стационарных видов и импульсных излучений, в том числе и влияние ОЯЧ, на характеристики субмикронных кремниевых и кремний-германиевых биполярных транзисторов. Основные требования, предъявляемые к этим моделям, является адекватность их физического описания и достаточная точность, так как от этого зависит достоверность приборно-технологического и схемотехнического проектирования.

Состояние исследований по проблеме.

<u>1.Модели для приборно-технологического проектирования.</u> Существенный вклад в разработку математических моделей для приборно-технологического проектирования с учётом радиационного воздействия и использование этих моделей для расчёта радиационно-стойких БТ и ГБТ внесли отечественные авторы: Д.Г. Дроздов, Т.Ю. Крупкина, В.С. Першенков, К.О. Петросянц, Е.М. Савченко, А.И. Чумаков, Н.А. Шелепин и др., также зарубежные авторы: R. J. Milanowski, А.К. Sutton, J. D. Cressler, М. Bellini, К.А. Моеп, М. Benoit и др.

существующих приборно-Однако, В сегодня коммерческих системах технологического моделирования используются встроенные модели учета радиационных эффектов с рядом существенных ограничений, либо учитывается влияние только одного стационарного вида радиации, а именно гамма-излучения, либо используются обобщенные модели ионизационных и структурных эффектов, но не учитывающие специфики структур современных биполярных приборов. Работы по моделированию радиационных процессов с помощью системы TCAD в Si БТ и SiGe ГБТ после облучения нейтронами и протонами не публиковались. Наряду с этим в системе TCAD достаточно хорошо развиты модели, учитывающие влияние ОЯЧ на переходные характеристики полупроводниковых приборов.

Таким образом, в промышленных приборно-технологических САПР сегодня отсутствуют математические модели радиационных эффектов, которые бы полностью удовлетворяли потребности разработчиков полупроводниковых приборов и схем в части учёта влияния стационарного нейтронного, протонного и гамма-излучений на характеристики Si БT и SiGe ГБТ.

<u>2. SPICE-модели Si БТ и SiGe ГБТ для радиационно-стойких ИС и БИС.</u> Существенный вклад в разработку математических моделей для схемотехнического проекти-

рования с учётом радиационного воздействия и их использование для расчёта радиационно-стойких БИС на БТ внесли отечественные авторы: Ю.Ф. Адамов, В.Н. Гришков, О.В. Дворников, А.И. Титов, К. О. Петросянц, В.В. Репин, П.К. Скоробогатов, И. А. Харитонов, а также ряд зарубежных авторов: М. Van Uffelen, T.A Deng Yanqing, T. Zimmer, R.W. Dutton, H. Barnaby и др.

Для учёта влияния радиационных эффектов используются два подхода: 1) введение в SPICE-модель зависимости параметров модели биполярного транзистора от поглощенной дозы; 2) макромодельный подход, который заключается в добавлении к основному транзистору, описываемому одной из известных стандартных SPICE-моделей Si БT или SiGe ГБT, дополнительных схемных элементов, учитывающих влияние разных видов радиационных излучений.

Анализ существующих работ показал, что стандартные схемотехнические модели субмикронных Si БT и SiGe ГБТ, включённые в SPICE-подобные программы анализа ИС и БИС, или вообще не учитывают радиационные эффекты, или имеют ряд недостатков, а именно: низкую точность моделирования деградации характеристик транзисторов, обусловленную влиянием радиации; использование различных эквивалентных схем, систем выражений и параметров для учёта влияния разных видов излучений, существенно отличающихся от стандартных и поэтому мало знакомых разработчикам приборов и схем; слишком сложные системы измерений дополнительных характеристик, необходимых для определения набора параметров SPICE-RAD-модели, и учитывающих радиационные эффекты. Наряду с этим в рамках сквозного TCAD-SPICE проектирования наличие единой SPICE-RAD-макромодели, учитывающей основные радиационные эффекты при воздействии различных видов радиации, является необходимым условием. Так как использование разнородных SPICE-моделей, которые описываются собственной системой измерения и набором параметров для каждого типа излучения, приводит к увеличению затрат времени на подготовку модели Si БT/SiGe ГБТ к схемотехническому моделированию ИС и БИС.

Кроме разработки самих компактных моделей БТ, учитывающих радиационные эффекты, необходимо решать вопросы по экстракции радиационно-зависимых параметров этих моделей. Однако, в большинстве опубликованных работ процедуры измерения тестовых структур и процедуры экстракции параметров приборов, подвергнутых воздействию радиации, в литературе освещены крайне недостаточно.

Одной из задач настоящей диссертация является: разработка и исследование универсальной схемотехнической SPICE-RAD-модели для субмикронных Si БT и SiGe ГБТ, а также разработка методики экстракции параметров этой модели на основе, измеренных электрических характеристик тестовых приборов до и после облучения или, полученных из результатов моделирования приборов с использованием системы TCAD.

Цель диссертационной работы и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка математических моделей для приборнотехнологического и схемотехнического моделирования субмикронных Si БT и SiGe ГБТ с учетом воздействия различных видов радиации (нейтронов, протонов, электронов и гамма-квантов).

Цель достигается путем решения следующих задач:

1) Разработка математических моделей электрофизических эффектов, встроенных в систему TCAD и учитывающих влияние различных видов радиационного воздействия: нейтронного, протонного и гамма-излучения на электрофизические и электрические характеристики биполярных Si и SiGe транзисторных структур.

2) Разработка унифицированной SPICE-RAD-модели для Si БT и SiGe ГБТ, имеющей единую эквивалентную схему и систему выражений для учета различных видов стационарного радиационного воздействия (электронного, нейтронного, протонного и гамма-излучения).

3) Включение разработанных моделей учета физических эффектов и компактной SPICE-RAD-модели Si БT и SiGe ГБТ в существующие промышленные системы приборно-технологического и схемотехнического проектирования с целью проведения расчетов приборов и электронных схем с учетом радиационных эффектов.

4) Использование всей совокупности разработанных моделей в практике проектирования радиационно-стойких Si и SiGe биполярных структур и БИС на их основе.

<u>Методы исследования</u>: методы экспериментального определения электрических характеристик тестовых структур, математические методы обработки результатов измерений, компьютерный анализ и моделирование, методы проведения вычислительных экспериментов.

<u>Научная новизна работы</u> состоит в том, что разработаны и встроены в среду промышленных приборно-технологических и схемотехнических САПР модели для расчета электрофизических и электрических характеристик Si и SiGe биполярных транзи-

сторов с учетом влияния нейтронного, протонного, электронного и гамма-излучений, в частности:

• для систем приборно-технологического моделирования:

1) Предложена модель, учитывающая воздействие нейтронов на основной электрофизический параметр структуры БТ – время жизни неосновных носителей заряда, для которого введены зависимости от величины флюенса, уровня инжекции и легирования активной области прибора, что впервые позволило с достаточной точностью расчетным путем оценить воздействие нейтронов на электрические характеристики Si БТ и SiGe ГБТ.

2) Предложена модель для учета воздействия гамма-излучения на характеристики Si БT и SiGe ГБT, которая помимо ранее известной зависимости скорости генерации электронно-дырочных пар в SiO₂ от поглощённой дозы, дополнительно учитывает изменение скорости поверхностной рекомбинации и накопление ловушек на границе раздела Si/SiO₂ от поглощённой дозы, что существенно повышает точность моделирования.

3) Предложена модель, учитывающая совместное влияние структурных и ионизационных эффектов, обусловленных действием протонов, на электрофизические и электрические характеристики Si БT и SiGe ГБТ. Модель включает в себя частные модели для нейтронного (п. 1) и гамма-излучений (п. 2) в сочетании с методикой определения для них флюенса и дозы, эквивалентных воздействию протонов с определенной энергией. Предложенная модель впервые позволяет с достаточной точностью оценить воздействие протонов на электрические характеристики Si БT и SiGe ГБТ.

Погрешность моделирования статических ВАХ и частотных характеристик для трех моделей, учитывающих действие нейтронов, гамма-квантов и протонов в диапазонах воздействий, представляющих практический интерес, составляет 15-20%.

• для систем схемотехнического проектирования на базе платформы SPICE:

4) Предложена и развита унифицированная SPICE-макромодель Si БT и SiGe ГБT, которая имеет одну и ту же эквивалентную схему и систему выражений для разных видов радиационного воздействия (электронного, протонного, нейтронного и гамма-излучений). По сравнению с существующим набором разнородных версий SPICE-RAD-моделей, значительно сокращается количество параметров, описывающих радиационно-зависимые элементы модели, упрощается методика их определения, сокращается трудоемкость подготовки и обработки данных до и после расчета.

5) По сравнению с ранее известными SPICE-моделями, в предложенной макромодели, дополнительно учтен эффект усиления радиационной деградации параметров от влияния «горячих» носителей и эффект сдвига выходных коллекторных характеристик в области насыщения и лавинного пробоя, что существенно повышает точность моделирования аналоговых и аналого-цифровых схем.

Погрешность моделирования электрических характеристик Si БT и SiGe ГБТ БИС, подвергнутых воздействию электронов, нейтронов, протонов и гамма-квантов составляет: 10–15% для статических ВАХ и 15–20% для динамических характеристик в широком диапазоне доз и потоков радиации.

Практическая значимость работы.

1) Разработанные радиационные модели электрофизических эффектов встроены в промышленный вариант TCAD Sentaurus Synopsys и могут быть использованы для проектирования радиационно-стойких Si БT и SiGe ГБT, позволяя прогнозировать их электрические характеристики при воздействии нейтронного, протонного и гаммаизлучений.

2) Унифицированная SPICE-модель может быть использована в промышленных схемотехнических САПР Eldo (Mentor Graphics), Spectre, UltraSim (Cadence), HSpice (Synopsys) для проектирования радиационно-стойких ИС, позволяя рассчитывать электрические характеристики Si БТ и SiGe ГБТ БИС при воздействии различных видов радиации в широком диапазоне действующего фактора. По сравнению с используемым в существующих симуляторах набором отдельных SPICE-моделей для каждого вида воздействия, унифицированная модель, общая для всех видов радиационного воздействий, описывается значительно меньшим количеством параметров, имеет более простую методику их определения, что позволяет сократить трудоемкость и время подготовки и обработки данных до и после расчета.

3) Для пользователей разработаны полуавтоматические процедуры определения параметров биполярных транзисторов с учётом воздействия стационарного радиационного излучения на основе результатов измерений тестовых образцов или результатов приборно-технологического моделирования в системе TCAD.

Внедрение результатов работы.

Результаты диссертационной работы были использованы в НИОКР следующих предприятий: ОАО «НПП «Пульсар», АО «Корпорация «ВНИИЭМ», ФГБНУ «НИИ ПМТ», что подтверждено актами внедрения:

1) НИР «Стойкость-ТЗЧ» и ОКР «Высотка-26».

2) НИР «Исследование и разработка радиационных моделей элементов кремнийгерманиевых аналого-цифровых БиКМОП СБИС для проектирования космической радио- и телекоммуникационной аппаратуры».

3) НИОКР «Создание системы управления поворотами БС КА», а также при выполнении госбюджетных НИР по программам РФФИ, КЦП и научного фонда НИУ ВШЭ:

4) Создание модулей контроля параметров потоков космических излучений на базе широкозонных полупроводниковых сенсоров для перспективных транспортных космических систем с длительным сроком функционирования.

5) Разработка методов многоуровневого исследования и моделирования элементов перспективных изделий микроэлектроники: от уровня материала до уровня схем с повышенной стойкостью к температурным и радиационным воздействиям. Шифр: T3-108.

6) «Разработка методов, моделей и баз данных для проектирования электронных компонентов ЭВМ и РЭА космического назначения (полупроводниковых приборов, микросхем, СБИС, печатных плат) с учётом радиации и температуры».

7) «Исследования характеристик субмикронных и глубоко субмикронных кремний-германиевых биполярных и МОП гетероструктурных транзисторов аналогоцифровых Би-КМОП СБИС для радио- и телекоммуникационных систем».

8) «Поисковые исследования в области СВЧ БИС на основе кремнийгерманиевых гетероструктур для систем беспроводной связи и радарной техники».

Положения, выносимые на защиту.

1) Математическая модель, встроенная в систему TCAD, учитывающая деградацию электрофизических параметров (S, N_{it}, Q_{ox}) и электрических характеристик субмикронных Si БT и SiGe ГБT, обусловленную эффектами ионизации при воздействии гамма-излучения.

2) Математическая модель, встроенная в систему TCAD, учитывающая деградацию электрофизических параметров (τ_p , τ_n) и электрических характеристик субмикронных Si БT и SiGe ГБT, обусловленную структурными нарушениями при воздействии нейтронного излучения.

3) Математическая модель, встроенная в систему TCAD, учитывающая деградацию электрофизических и электрических характеристик субмикронных Si БT и SiGe ГБТ, обусловленную совместным влиянием ионизационных и структурных эффектов при воздействии протонного излучения.

4) Схемотехническая унифицированная SPICE-макромодель для субмикронных Si БT и SiGe ГБТ, учитывающая дозовые эффекты от воздействия различных видов радиации, эффект усиления радиационной деградации параметров от влияния «горячих» носителей, эффекты сдвига коллекторных характеристик в области насыщения и лавинного пробоя.

5) Результаты использования разработанных TCAD и SPICE моделей при проектировании радиационно-стойких субмикронных Si БT и SiGe ГБТ и схем на их основе.

<u>Апробация результатов работы.</u> Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

• Конференции RADECS-2015, Москва, Россия, сентябрь 2015.

• Научной сессии НИЯУ МИФИ-2015, Москва, Россия, апрель 2015.

• Международном симпозиуме «Компьютерные измерительные технологии» – 2015, Москва, апрель 2015.

• Научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е.В. Арменского, НИУ ВШЭ, Москва, Россия, 2012-2015.

• 4th International Conference on Advanced Measurement and Test, (AMT 2014), November, 2014, Wuhan, China

• Х и XII научно-технической конференции "Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА" ОАО «НПП «Пульсар», г. Дубна, Октябрь 2011; г. Москва, Октябрь 2013.

• Международной научно-практической конференции "International Scientific – Practical Conference" Innovative Information Technologies", Prague, 2013, 2014.

• IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), 2011, 2012, 2013.

 2-й Международной молодёжной научной школе «Приборы и методы экспериментальной ядерной физики. Электроника и автоматика экспериментальных установок»,
 г. Дубна, Моск. обл., Объединенный институт ядерных исследований, ноябрь 2011.

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в 19 печатных работах (в период с 2011 по 2015 гг.), из которых 4 [2]-[5] в изданиях, входящих в перечень ВАК; 4 – в систему цитирования SCOPUS; 2 работы опубликованы без соавторов.

<u>Объём и структура работы.</u> Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложения. Объём работы составляет 149 страницу, в том числе 107 рисунков, 6 таблиц.

В главе 1 приведён анализ современного состояния работ в области приборнотехнологического моделирования структур Si и SiGe биполярных транзисторов и разработки компактных схемотехнических SPICE-моделей этих транзисторов с учетом различных видов стационарного радиационного воздействия.

По результатам анализа перечисленных в главе отечественных и зарубежных работ, посвященных приборно-технологическому моделированию, можно сделать вывод, что количество работ, направленных на исследование в системе TCAD влиянию радиационных эффектов на электрические характеристики Si БT и SiGe ГБТ, явно недостаточно и не отражает современного состояния проблемы. Исследования ограничиваются или набором стандартных моделей, входящих в состав TCAD и учитывающих часть радиационных эффектов, обусловленных воздействием только гамма-квантов, или используют обобщенные модели структурных и ионизационных эффектов, которые пока не адаптированы под структуры Si БT и SiGe ГБТ, или ориентированы на решение отдельных частных задач. TCAD модели, учитывающие нейтронное или протонное излучение, в публикациях пока отсутствуют.

По результатам анализа перечисленных в главе отечественных и зарубежных работ, посвященных схемотехническому моделированию, можно сделать следующие выводы: 1) для каждого вида радиационного воздействия (электроны, нейтроны, протоны, гамма-кванты) имеется своя модель, или ограниченный набор моделей со своей эквивалентной схемой, системой дополнительных параметров, существенно отличающихся от стандартных или общепринятых, и поэтому малопонятных или вообще незнакомых разработчикам приборов и схем; 2) для большинства моделей методики измерения ВАХ и процедуры экстракции параметров, учитывающих радиационные эффекты, достаточно

сложны и практически не описаны в публикациях; 3) ряд моделей не обеспечивает необходимую для современных БТ точность расчета, например, базируется на основе простейшего варианта Гуммеля-Пуна, или не учитывают важные эффекты радиационного сдвига коллекторных ВАХ в режиме насыщения и лавинного пробоя, усиления деградации параметров из-за влияния «горячих» носителей и др.

На основании сделанных выводов сформулирована цель и задачи настоящей диссертации, направленные на решение указанных проблем и устранение имеющихся недостатков.

В главе 2 приведены разработанные и встроенные в систему TCAD новые математические модели, описывающие изменение электрофизических параметров (S, τ_p , τ_n , N_{it}), учитывающих рекомбинацию носителей заряда и накопление заряда ловушек Q_{it} на границе раздела Si-SiO₂, и позволяющие прогнозировать деградацию электрофизических параметров и электрических характеристик Si БT и SiGe ГБT при воздействии нейтронного, протонного и гамма-излучения.

Для учета влияния гамма-излучения на характеристики Si БT и SiGe ГБТ были разработаны и включены в TCAD модели радиационных эффектов, описывающие изменения концентрации ловушек на границе раздела Si/SiO₂ и скорости поверхностной рекомбинации.

Для учета влияния нейтронного излучения на характеристики Si БT и SiGe ГБТ разработана и включена в TCAD модель радиационных эффектов, которая учитывает деградацию основного параметра биполярной структуры – времени жизни неосновных носителей заряда в зависимости от интегрального потока нейтронов.

Для учета влияния протонного излучения на электрические характеристики Si БT и SiGe ГБТ в TCAD использовался подход, суть которого заключается в том, что полное изменение электрических характеристик биполярных транзисторов определяется совместным действием структурных (аналогично нейтронному излучению) дефектов и ионизационных (аналогично гамма-излучению) эффектов.

Все модели были созданы с использованием известных физических зависимостей и добавлены в структуру системы TCAD с использованием физического пользовательского интерфейса.

Адекватность разработанных моделей проиллюстрирована на примерах сравнения экспериментальных и смоделированных характеристик при воздействии нейтронного,

протонного и гамма-излучений для биполярных Si и SiGe структур, изготовленных по различным технологиям. При этом проведение радиационных испытаний и измерения экспериментальные характеристики до и после облучения для Si биполярных транзисторов автором были проведены лично, либо с непосредственным его участием. Результаты сравнения показывают, что для элементов с размерами вплоть до субмикронных (до 0,1 мкм) погрешность описания составляет: 10–20% для статических BAX и 15–20% для динамических характеристик в широком диапазоне доз и интегральных потоков радиации.

В главе **3** представлена, разработанная автором, универсальная SPICE-RAD-макромодель, учитывающая влияние радиации на характеристики Si БT и SiGe ГБТ, изготовленных по различным технологиям с размерами вплоть до субмикронных (до 0,1 мкм). Также представлена методика экстракции параметров макромодели из результатов измерения электрических характеристик необлучённых и облучённых тестовых транзисторов или результатов приборно-технологического моделирования.

Унифицированная SPICE-RAD-макромодель Si БT и SiGe ГБТ для схемотехнического проектирования элементов Si БT и SiGe ГБТ и БИС на их основе, подвергнутых воздействию различных видов радиационного воздействия, базируется на двух подходах: 1) макромодельного; 2) введения зависимостей ряда параметров базовой SPICEмодели от поглощенной дозы.

Представлены полуавтоматические процедуры определения дополнительного набора радиационно-зависимых параметров SPICE-RAD-модели биполярных транзисторов с учётом воздействия стационарного радиационного излучения на основе результатов измерений тестовых образцов или результатов приборного моделирования в системе TCAD.

В главе 4 приведены результаты использования разработанных в диссертации моделей для приборно-технологического и схемотехнического моделирования Si БT и SiGe ГБТ и фрагментов радиационно-стойких БИС на их основе, полученные при выполнении ряда НИОКР с предприятиями Росэлектроники и Роскосмоса, а также проектов по ФЦП и грантам РФФИ и НИУ ВШЭ.

В приложениях приведены акты внедрения результатов работы в различных организациях.

Глава 1 Современное состояние работ в области моделирования Si и SiGe биполярных транзисторных структур с учетом радиационных эффектов

1.1 Обзор современного состояния исследований в области приборнотехнологического моделирования радиационных эффектов в структуре Si и SiGe биполярных транзисторов

Моделирование Si БT и SiGe ГБT структур в системе TCAD с целью исследования различных конструктивно-технологических вариантов их исполнения с использованием многовариантного анализа широко используется в практике проектирования полупроводниковых приборов [6]-[9].

Особое значение имеют TCAD модели при исследовании радиационных эффектов в биполярных транзисторах при воздействии на них стационарных видов излучения и отдельных ядерных частиц (ОЯЧ), так как физика этих процессов чрезвычайно сложна и недостаточно исследована. Проведение экспериментальных исследований, является достаточно сложным и дорогим, а в ряде случаев невозможным. Поэтому математическое моделирование – единственный способ получить необходимую информацию о процессах в БТ при облучении.

В настоящее время для приборно-технологического проектирования широко применяются программы Sentaurus фирмы Synopsys и TCAD фирмы SILVACO. В этих САПР включены некоторые модели радиационных эффектов.

В программу Sentaurus Synopsys входят модели для учета стационарного гаммаизлучения и воздействия ОЯЧ. Учет влияния гамма-излучения в Sentaurus Synopsys осуществляется моделью, которая описывает скорость генерации электронно-дырочных пар в объеме SiO₂. Однако, этого не достаточно для моделирования электрических характеристик Si БТ и SiGe ГБТ с учетом гамма-излучения, так как не учитывает два основных эффекта: 1) образование поверхностных состояний; 2) изменение скорости поверхностной рекомбинации.

В ТСАD фирмы SILVACO [8] разработаны механизмы влияния структурных дефектов и ионизационных эффектов с использованием ловушек в объеме структуры прибора. Однако данные механизмы были адаптированы только к структуре металл-оксидполупроводникового (МОП) транзистора, и пока не подходят к структурам Si БТ и SiGe ГБТ. В программе TCAD SILVACO также достаточно полно описано влияние ОЯЧ на электрические характеристики полупроводниковых приборов.

Учет влияния ОЯЧ на переходные электрические характеристики биполярных транзисторов и интегральных схем является самостоятельным направлением исследований и в настоящей диссертации не рассматривается.

Существенный вклад в разработку математических моделей для приборнотехнологического проектирования с учётом радиационного воздействия и использование этих моделей для расчёта радиационно-стойких БТ и ГБТ внесли отечественные авторы: Д.Г. Дроздов, Т.Ю. Крупкина, В.С. Першенков, К.О. Петросянц, Е.М. Савченко, А.И. Чумаков, Н.А. Шелепин и др., также зарубежные авторы: R. J. Milanowski, А.К. Sutton, J. D. Cressler, M. Bellini, K. A. Moen, M. Benoit и др.

В работах [10], [11] рассматриваются вопросы и разработки быстродействующих субмикронных интегральных Si БT и SiGe ГБT с использованием TCAD моделирования. В работах [12]-[14] приводятся методики, критерии выбора моделей при моделировании субмикронных транзисторов, а также описаны основные проблемы приборнотехнологического моделирования биполярных структур.

В работе Т.Ю. Крупкиной [15] рассматриваются общие подходы и методики приборно-технологического моделирования с учетом внешних воздействующих факторов, а также использование сквозного моделирования, когда основными результатами приборно-технологического моделирования являются схемотехнические параметры, которые в дальнейшем используются для проектирования БИС в схемотехнических САПР.

В работе В.В. Лавлинского [16] рассматриваются модели, алгоритмы синтеза проектных решений, а также модели и алгоритмы воздействий тяжёлых ядерных частиц на отдельные элементы или на совокупность элементов электронной компонентной базы специального назначения с возможностью оценивать радиационную стойкость элементов на энергетическом уровне и определять напряжённые связи с использованием методов синтеза виртуальной реальности.

В ряде работ [18], [19] проводятся исследования с использованием стандартных моделей в TCAD по накоплению заряда в объемной области оксида при воздействии гамма-излучения, а также отклику полупроводниковых приборов при воздействии ОЯЧ. В ряде зарубежных работ [20], [24] с использованием имеющихся в TCAD моделей ра-

диационных эффектов также исследуются только распределения заряда в объеме SiO₂, без последующей оценки его влияния на характеристики Si БT и SiGe ГБТ.

В работе R. J. Milanowski [21] исследуется влияние эффекта низкой интенсивности дозы гамма-излучения на накопление заряда в объеме SiO₂ и на границе материалов Si/SiO₂ в базе биполярного транзистора. Утверждается, что усиленная деградация характеристик БТ обусловлена влиянием граничных зарядов. При этом сами исследования рекомбинационных токов проводятся на упрощенной структуре базы биполярного транзистора.

В работе [23] исследовались радиационные эффекты в структурах планарных диодов и транзисторов после импульсного гамма-нейтронного воздействия путем учета распределения ловушек в объеме приборов. Однако при этом не учитывалось влияние изменения параметров материалов при воздействии радиации, влияние на радиационную стойкость уровня легирования базы, а также ряда других параметров.

В заключении обзора опубликованных работ, посвященных учету радиационных эффектов в системе моделирования TCAD, следует отметить, что во всех работах рассматривается исключительно воздействие гамма-квантов. Публикации по <u>учету воздействия нейтронов и протонов в системе TCAD отсутствуют.</u>

Таким образом, нерешённой задачей остаётся разработка математических моделей для электрофизических эффектов, возникающих в структурах биполярных полупроводниковых приборов при воздействии радиации с целью прогнозирования в системе TCAD характеристик субмикронных Si БT и SiGe ГБТ при облучении различными видами стационарных радиационных излучений: нейтронами, протонами и гаммаквантами.

1.2 Обзор современного состояния исследований в области разработки схемотехнических SPICE-моделей, учитывающих радиационные эффекты в Si и SiGe биполярных транзисторах

Интегральные схемы, применяемые в специальной аппаратуре, подвергаются воздействию различных видов радиационного облучения: гамма-квантов, электронов, нейтронов и протонов, а также ОЯЧ, что приводит к деградации электрических характеристик ИС. Поэтому, в схемотехнических САПР, предназначенных для расчета радиационно-стойких ИС и БИС, необходимо создавать библиотеки SPICE-моделей элементов, которые учитывают влияние радиационных эффектов.

К сожалению, сегодня применение SPICE-подобных программ анализа ИС и БИС ограничено, как правило, стандартными схемотехническими модели, которые не учитывают радиационные эффекты. Учет влияния радиационных факторов на электрические характеристики Si БT и SiGe ГБТ осуществляется с использованием двух подходов: введение зависимостей параметров SPICE-модели биполярного транзистора от поглощенной дозы [25], [26], [29], [30] или создание компактных моделей [27], [28], [31], [33]-[37], [39]-[41], в которые вводятся дополнительные элементы, параметры которых зависят от поглощенной дозы или интегрального потока. Оба подхода используются отечественными и зарубежными специалистами.

Первый подход, который заключается во внесении зависимостей основных параметров SPICE-модели биполярного транзистора от уровня воздействующего фактора, является достаточно трудоемким, так как зависимости параметров SPICE-модели биполярных транзисторов от поглощенной дозы необходимо задать для большого числа параметров SPICE-модели. При этом каждая модель биполярного транзистора VBIC, Mextram, GP и др. описывается своим набором SPICE-параметров. Поэтому требуются переделывать модель транзисторов в каждом случае, когда требуется учитывать дополнительные эффекты или использовать другую базовую модель БТ, что накладывает ограничения на применение разработанной модели.

Второй подход заключается в подключении к базовой модели (ядру), описываемой одной из известных стандартных SPICE-моделей Si БT или SiGe ГБТ, дополнительных схемных элементов, учитывающих специфику влияния радиационных излучений на электрические характеристики биполярного транзистора. Такой подход обеспечивает достаточную точность. При этом время моделирования существенно не изменяется. Однако, на разработчика накладываются дополнительные требования по знанию схемотехники и особенностей конкретного симулятора.

В большинстве практических случаев провести необходимые модификации может любой квалифицированный пользователь целевой САПР.

1.2.1 Анализ математических моделей для схемотехнического моделирования с учётом радиационных эффектов в структуре Si и SiGe биполярных транзисторов

Математические модели для схемотехнического моделирования при воздействии радиационного облучения субмикронных Si БT и SiGe ГБТ приведены в работах отечественных авторов А.С. Аверяскина, А.В. Хананова, С.Г. Крутчинского, А.Е. Титова, А.И. Серебрякова, О.В. Дворникова, В.Н. Гришкова, К.О. Петросянца, И.А. Харитонова, Э.Н. Вологдина, Д.С. Смирнова и др. [26]-[34], а также зарубежных авторов: М. Van Uffelen, P. Leroux, W. De Cock, Deng Yanqing T.A. Fjeldly, D.G. Mavis and P.H. Eaton, H. S. Hajghassem, J. R. Yeargan, O. Rinaudo, T. Zimmer [35]-[44] и др.

Существенный вклад в разработку математических моделей для схемотехнического моделирования с учётом радиационного воздействия и их использование для расчёта радиационно-стойких биполярных БИС внесли отечественные авторы Ю.Ф. Адамов, В.Н. Гришков, О.В. Дворников, А.И. Титов, К. О. Петросянц, В.В. Репин, П.К. Скоробогатов, И. А. Харитонов, а также ряд зарубежных авторов: М. Van Uffelen, T.A Deng Yanqing, T. Zimmer, R.W. Dutton, H. Barnaby и др.

В работе <u>К.О. Петросянца, И.А. Харитонова</u> [28] (МИЭМ) описана модель биполярного транзистора с учетом поглощенной дозы, с помощью добавления выражений для ряда параметров модели Гуммеля-Пуна, которые зависят от суммарной поглощенной дозы.

Подход, описанный в данной работе, можно использовать для моделирования биполярных транзисторов с учетом радиационных эффектов на базе модели Гуммеля-Пуна. Предлагаемая модель с достаточной точностью описывает изменение тока базы при воздействии нейтронного и гамма-излучения. Однако она не учитывает эффекты усиления радиационной деградации параметров от влияния «горячих» носителей, а также эффекты сдвига выходных коллекторных характеристики в области насыщения и лавинного пробоя и не подходит для моделирования SiGe ГБТ, так как модель Гуммеля-Пуна не учитывает некоторые температурные эффекты, в том числе и эффект саморазогрева.

В работах <u>Э.Н Вологдина, Д.С. Смирнова и др.</u>[30],[29] используется аналогичная модель, но только для меньшего числа параметров. При этом делается попытка описать деградацию БТ не только по экспериментальным результатам, но и по результатам рас-

четных методик. В качестве базовой модели также используется модель Гуммеля-Пуна. Модель позволяет учитывать деградацию БТ при воздействии нейтронного излучения. При этом данная модель также не учитывает эффекты усиления радиационной деградации параметров от влияния «горячих» носителей, а также эффекты сдвига выходных коллекторных характеристики в области насыщения и лавинного пробоя.

В работах <u>О.В. Дворникова, В.Н. Гришкова [31],[32]</u> представлена макромодель для учета воздействия радиации, в которой наряду с дополнительными элементами для ряда параметров добавлены уравнения, зависящие от поглощенной дозы. Предполагается возможность учета различных видов радиации, для этого в структуру программы добавлен дополнительный блок для пересчета одного вида излучения в другой. В качестве базовой модели используется модель Гуммеля-Пуна, что не позволяет ее использовать для моделирования SiGe ГБТ. К сожалению, не приводятся методики экстракции радиационно-зависимых параметров, что усложняет работу с данной моделью.

В работах <u>M. Van Uffelen и др.</u>[34], [36] предложена макромодель для учета влияния гамма-излучения на характеристики SiGe ГБТ. В эквивалентную схему добавлены: источника тока между базой и эмиттером, который учитывает увеличение тока базы транзистора; источника тока подключенного между коллектором и эмиттером, учитывающий дополнительного изменения тока коллектора в активном режиме; источника напряжения в цепи коллектора, который учитывает изменение напряжения насыщения на выходных характеристиках. Макромодель позволяет с достаточной степенью точности описывать деградацию характеристик SiGe ГБТ при воздействии радиации с дозой до $2 \cdot 10^8$ рад. Однако, использование предложенной макромодели приводит к появлению отрицательных токов на выходной характеристике биполярного транзистора при воздействии гамма-излучения, что резко ограничивает возможность ее применения при расчете схем. Кроме того, не описана методика экстракции параметров модели.

В работе <u>Deng Yanqing u dp.</u> [37] представлена макромодель для учета влияния нейтронного излучения на характеристики Si БT. Представленная модель учитывает только объемную составляющую тока рекомбинации, что ограничивает область ее применения. Также не представлены методики экстракции радиационно-зависимых параметров макромодели.

1.3 Выводы по главе 1

По результатам анализа отечественных и зарубежных работ, посвященных приборно-технологическому моделированию, можно сделать вывод, что количество работ, направленных на исследование в системе TCAD влияния радиационных эффектов на электрические характеристики Si БT и SiGe ГБТ, явно недостаточно и не отражает современного состояния проблемы. Исследования ограничиваются или набором стандартных моделей, входящих в состав TCAD и учитывающих часть радиационных эффектов, обусловленных воздействием только гамма-квантов, или используют обобщенные модели структурных и ионизационных эффектов, которые пока не адаптированы под структуры Si БT и SiGe ГБТ, или ориентированы на решение отдельных частных задач. TCAD модели, учитывающие нейтронное или протонное излучение, в публикациях пока отсутствуют.

Таким образом, <u>целью №1</u>, которая поставлена в настоящей диссертации, является: разработка математических моделей электрофизических эффектов, возникающих в структурах биполярных полупроводниковых приборов при воздействии радиации, с целью моделирования и расчета в системе TCAD характеристик субмикронных Si БT и SiGe ГБТ при облучении различными видами стационарных радиационных излучений: нейтронами, гамма-квантами, протонами.

По результатам анализа отечественных и зарубежных работ в области схемотехнического моделирования можно сделать выводы: 1) для каждого вида радиационного воздействия (электроны, нейтроны, протоны, гамма-кванты) имеется своя модель, или ограниченный набор моделей со своей эквивалентной схемой, системой дополнительных параметров, существенно отличающихся от стандартных или общепринятых и поэтому малопонятных или вообще незнакомых разработчикам приборов и схем; 2) для большинства моделей методики измерения ВАХ и процедуры экстракции параметров, учитывающих радиационные эффекты, достаточно сложны и практически не описаны в публикациях; 3) ряд моделей не обеспечивает необходимую для современных БТ точность расчета, например, базируется на основе простейшего варианта Гуммеля-Пуна, или не учитывают важные эффекты радиационного сдвига коллекторных ВАХ в режиме насыщения и лавинного пробоя, усиления деградации параметров из-за влияния «горячих» носителей и др. Таким образом, <u>целью №2</u> является: разработка унифицированной SPICE-макромодели для Si БT и SiGe ГБТ, имеющей единую эквивалентную схему и систему уравнений для разных видов радиационного воздействия (электронного, протонного, нейтронного и гамма-излучений) и учитывающей эффект усиления радиационной деградации параметров от влияния «горячих» носителей и эффект сдвига выходных коллекторных характеристик в области насыщения и лавинного пробоя.

Глава 2 Приборно-технологические модели, учитывающие радиационные эффекты в структуре Si БT и SiGe ГБТ

2.1 TCAD модель электрофизических параметров, учитывающая влияние гамма-излучения в структурах Si БT и SiGe ГБТ

Проектирование электронной компонентной базы обычно состоит из нескольких этапов. В настоящее время на основных этапах проектирования (приборнотехнологическое, схемотехническое и т.п.) широко используется математическое моделирование полупроводниковых приборов. На этапе приборно-технологического моделирования широко используются промышленные системы TCAD (Technology Computer-Aided Design) Sentaurus Synopsys и TCAD SILVACO для моделирования полупроводниковых приборов и элементов БИС, производимых по различным технологиям. Как говорилось ранее, сфера применения данных САПР ограничивается набором стандартных моделей для моделирования биполярных структур и элементов ИС. Однако, необходимо иметь инструмент для сквозного проектирования радиационно-стойкой элементной базы для аппаратуры специального назначения, когда выходными параметрами приборнотехнологического моделирования являются схемотехнические параметры биполярной структуры до и после воздействия радиации. В данной работе в качестве системы приборно-технологического проектирования используется Sentaurus фирмы Synopsys [44].

Математической основой системы TCAD является численное решение фундаментальной системы выражений физики полупроводниковых приборов, которое для диффузионно-дрейфового механизма переноса носителей состоит из следующих выражений: плотности тока электронов и дырок (2.1); плотности поверхностного тока (2.2); Пуассона для распределения электростатического потенциала (2.3); темпа рекомбинация Шокли-Рид-Холла (2.4), концентрации равновесных носителей (2.5); темпа Оже рекомбинации (2.6); скорости поверхностной рекомбинации (2.7); непрерывности (2.8):

$$j_n = -q\mu_n n \left(\nabla \phi_n + P_n \nabla T \right), j_p = -q\mu_p p \left(\nabla \phi_p + P_p \nabla T \right);$$
(2.1)

$$j_{n,surf} = -qns_n, \ j_{p,surf} = -qps_p;$$
(2.2)

$$\nabla^2 \varphi = \frac{q}{\varepsilon} \left(p + N_D - n - N_A \right) - \rho_{trap}; \qquad (2.3)$$

$$R_{net}^{SRH} = \frac{np - n_{i,eff}^2}{\tau_p(n+n_1) + \tau_n(p+p_1)};$$
(2.4)

$$n_1 = n_{i,eff} \cdot \exp\left(\frac{E_{trap}}{kT}\right), \ p_1 = n_{i,eff} \cdot \exp\left(\frac{-E_{trap}}{kT}\right);$$
 (2.5)

$$R_{net}^{A} = \left(C_n n + C_p p\right) \left(np - n_{i,eff}^{2}\right); \qquad (2.6)$$

$$R_{surf,net}^{SRH} = \frac{np - n_{i,eff}^2}{(n+n_1) / s_p + (p+p_1) / s_n};$$
(2.7)

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G - R + \frac{1}{q} \nabla j_n, \quad \frac{\partial p}{\partial t} = G - R + \frac{1}{q} \nabla j_p; \quad (2.8)$$

где: $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \bar{i} + \frac{\partial}{\partial y} \bar{j}$, ε – диэлектрическая постоянная; q – заряд электрона; μ_n , μ_p – подвижность электронов и дырок, соответственно; n, p – концентрация электронов и дырок, соответственно; j_n, j_p – плотность тока электронов и дырок, соответственно; P_n, P_p, ϕ_n, ϕ_p – абсолютная термоЭДС, квазипотенциал Ферми электронов и дырок, соответственно; T – температура решетки; N_D, N_A – концентрация легирующей примеси доноров и акцепторов в транзисторной структуре; ρ_{trap} – заряд обусловленный захватом носителей ловушками; τ_n, τ_p – время жизни электронов и дырок, соответственно; $n_{i,eff}$ – внутренняя концентрация носителей; s_n, s_p – скорость поверхностной рекомбинации электронов и дырок, соответственно; C_n, C_p – Оже коэффициенты; G – скорость генерации; R – скорость рекомбинации.

Наряду с диффузионно-дрейфовой моделью в структуру ТСАD входят гидродинамическая и термодинамическая модели переноса носителей, которые более точно учитывают физические механизмы переноса носителей заряда в полупроводниковой структуре, рекомбинационно-генерационные механизмы, рассеивание и захват на ловушках, тепловые эффекты и другие физические механизмы, учитываемые при моделировании гетеропереходных и субмикронных биполярных транзисторов по традиционному маршруту приборно-технологического моделирования (см. рис. 2.1) [15]. Следует отметить, что электрофизические параметры, входящие в систему уравнений (2.1)-(2.8), такие как подвижность μ_n , μ_p , времена жизни τ_n , τ_p , скорости поверхностной рекомбинации s_n , s_p , темпы рекомбинации и ряд других, менее важных параметров, являются зависимыми от величины воздействующего радиационного фактора (дозы или потока).



Рис. 2.1. Традиционный маршрут приборно-технологического моделирования необлученного биполярного транзистора

Традиционный маршрут приборно-технологического моделирования ставит своей целью оптимизацию или усовершенствование ранее разработанной полупроводниковой, структуры или разработку новой структуры транзистора. Поэтому он базируется на следующих этапах: 1) воссоздание структуры или разработка новой структуры транзистора, входными данными которой являются топология, геометрия прибора и технологическая карта процесса изготовления транзистора (с помощью программы Structure Editor и т.п.); 2) контроль основных электрофизических параметров, точности сетки и структуры прибора (с помощью программы MESH, TechPlot и т.п.); 3) выбор и подключение нужных моделей для учета физических эффектов из стандартного набора системы TCAD (стандартные модели Recombination, Mobility, Radiation и т.п.); 4) проведение виртуальных измерений полупроводниковой структуры (с помощью Sentaurus Device); 5) принятие решения о завершении расчета на основании выбранного критерия многовариантного анализа полупроводниковой структуры (в качестве критерия могут использоваться коэффициент усиления по току, граничная частота усиления и др.); 6) экстракция схемотехнических параметров полупроводниковой структуры с целью последующего использования при проектировании ИС (фрагментов БИС).

К сожалению, модели, учитывающие различные механизмы радиационных воздействий, реализованы в TCAD не полностью (например, только для поглощенной дозы гамма-излучения). Воздействия интегрального потока нейтронов и протонов для биполярных структур в TCAD пока не учитываются. При этом стоит учитывать, что SiGe ГБТ чувствительны к температурным эффектам [4]. Поэтому при разработке математических моделей учета радиационных эффектов в SiGe ГБТ необходимо учитывать также температурные эффекты.

В настоящей работе автором для учета влияния поглощенной дозы протонного и гамма-излучений и интегрального потока нейтронов с целью прогнозирования деградации электрических характеристик субмикронных Si БT и SiGe ГБТ в системе Sentaurus Synopsys, было сделано следующее:

1) Разработаны и усовершенствованы математические модели, позволяющие прогнозировать деградацию электрофизических параметров и электрических характеристик субмикронных Si БT и SiGe ГБT при воздействии нейтронного и протонного излучения (см. рис. 2.2).

2) Доработаны стандартные модели Sentaurus Synopsys, которые позволяют учитывать накопление заряда на границе раздела Si/SiO_2 и прогнозировать деградацию электрофизических параметров и электрических характеристик субмикронных Si БT и SiGe ГБT при воздействии гамма-излучения (см. рис. 2.2).

3) Разработан маршрут моделирования в системе Sentaurus Synopsys структуры транзистора при воздействии различных видов радиации с разными значениями поглощенной дозы и/или интегрального потока (см. рис. 2.3).

4) Разработана процедура корректировки параметров радиационных моделей по результатам измерений тестовых биполярных Si и SiGe структур.

Таким образом, в системе TCAD для учета радиационных эффектов сделано следующее: 1) для нейтронного излучения доработана модель Шокли-Рид-Холла, которая учитывает изменение времени жизни при облучении нейтронов от действия структурных эффектов; 2) для гамма-излучения уточнена стандартная модель гамма-излучения

путем введения зависимостей для концентрации ловушечного заряда и скорости поверхностной рекомбинации на границе раздела Si/SiO₂ от поглощенной дозы.



Рис. 2.2. Новые модели учета влияния радиационных эффектов на электрофизические параметры биполярных транзисторов при воздействии нейтронного, протонного и гамма-излучения

В отличие от традиционного маршрута проектирования для необлученного транзистора, маршрут с учетом радиационных эффектов имеет дополнительные шаги и этапы: 1) добавляются входные данные, а именно вид и уровни радиационного воздействия; 2) выбор и подключение модели учета радиационных эффектов для нужного типа излучения; 3) корректировка и уточнение параметров модели учета радиационных эффектов; 4) определение набора коэффициентов, аппроксимирующих радиационнозависимые параметры модели; 5) проведение виртуального эксперимента для заданных значений поглощенной дозы или интегрального потока; 6) оценка радиационной стойкости прибора.



Принятие решения о годности элементов по всем критериям

Рис. 2.3. Маршрут приборно-технологического моделирования с учетом влияния радиационных эффектов на электрофизические параметры биполярных транзисторов при воздействии нейтронного, протонного и гамма-излучений

2.1.1 Влияние гамма-излучения на характеристики биполярных транзисторов

При воздействии гамма-излучения на вещество с энергиями не более 10 МэВ возникают три механизма: фотоэлектрическое поглощение квантов излучения, комптоновское рассеяние квантов, образование электрон-позитронных пар [45], [53].

Эти три механизма вызывают генерацию электронно-дырочных пар в оксиде SiO₂ и захват дырок на ловушках вблизи поверхности, а также накопление поверхностных состояний на границах раздела Si/ SiO₂, что приводит к изменению скорости поверхностной рекомбинации. Заряд, накапливающийся в оксиде SiO₂ в результате захвата дырок, а также заряд поверхностных состояний на границе Si/SiO₂, приводят к деградации электрофизических параметров и электрических характеристик биполярных транзисторов: увеличиваются токи утечки и ток базы, вследствие чего уменьшается коэффициент усиления [46], [47]. На рис. 2.4 приведено схематичное сечение SiGe ГБТ, где показаны области, которые наиболее сильно влияют на характеристики при воздействии гамма-излучения [48].

Как видно из рис. 2.4 наиболее опасными областями являются части границы раздела Si/SiO₂, где на поверхность выходит эмиттерный и коллекторный pn-переход.

При оценке радиационной стойкости нужно учитывать структуру исследуемого транзистора и технологические решения, применяемые для увеличения производительности Si БT и SiGe ГБТ, так как они могут влиять на его радиационную стойкость к воздействию ионизирующего излучения. Так, например, использование глубокой щелевой изоляции приводит к уменьшению емкости коллекторного перехода [41], но одновременно увеличивает деградацию электрических характеристик при облучении гаммаквантами.



Рис. 2.4. Сечение SiGe ГБТ с указанием критичных областей, которые наиболее сильно влияют на характеристики при воздействии гамма-излучения

Помимо показанных областей, также влияют области глубокой и мелкой щелевой изоляции. На рис. 2.5 приведено сечение, где показано расположение ловушек в мелкой и глубокой щелевой изоляции.



Рис. 2.5. Сечение SiGe ГБТ, показывающее расположение ловушек в мелкой и глубокой щелевой изоляции

В работе [49] отмечается, что изменение размеров щелевой изоляции не приводит к существенному изменению деградации электрофизических характеристик при воздействии ионизирующего излучения. Этот факт подтверждают входные характеристики SiGe ГБТ без и с глубокой щелевой изоляцией, приведенные в работе [49] (см. рис. 2.6).





Таким образом, можно сделать вывод, что для моделирования в системе TCAD влияния гамма-излучения на структуры Si БT и SiGe ГБТ необходимо учитывать:

- накопление положительного заряда в SiO₂;
- образование ловушек на границе раздела Si/SiO₂;
- изменение скорости поверхностной рекомбинации на границе раздела Si/SiO₂.

2.1.2 TCAD модель электрофизических параметров, учитывающая влияние гамма-излучения на характеристики биполярных транзисторов

В Sentaurus Synopsys существует радиационная модель для описания скорости генерации электронно-дырочных пар в SiO₂ при воздействии гамма-излучения. Этот параметр описывается следующим выражением:

$$G = \left(\frac{E + E_1}{E + E_0}\right)^m g_0 D, \qquad (2.9)$$

где: Е-величина электрического поля (В/м), E_0 , E_1 , m – коэффициенты, определяющие зависимость от электрического поля, g_0 – ионизационная постоянная оксида (pag⁻¹·cm⁻³), D – мощность дозы излучения (pag/c).

На рис. 2.7 представлено сравнение экспериментальных и смоделированных входных ВАХ для SiGe ГБТ, изготовленного по 0,18 мкм 7HP БиКМОП технологии с $\beta = 250, f_T = 120$ ГГц, $f_{max} = 100$ ГГц, полученное для радиационных моделей с дозой $D_{\gamma} = 10 \cdot 10^6$ рад учитывающих: 1) только накопление заряда Q_{ox} в SiO₂ (стандартная модель); 2) накопление заряда Q_{ox} в SiO₂, накопление заряда Q_{it} на границе раздела Si/SiO₂; 3) накопление заряда Q_{ox} в SiO₂, накопление заряда Q_{it} на границе раздела Si/SiO₂ и изменение скорости поверхностной рекомбинации *S*.



Рис. 2.7. Сравнение экспериментальных и смоделированных входных ВАХ для SiGe ГБТ для 3-х радиационных моделей

Из рис. 2.7 видно, что радиационная модель гамма-излучения, поставляемая вместе с дистрибутивом TCAD, недостаточна для моделирования биполярных структур, так как не учитываются два важных эффекта: 1) образование ловушек на границе раздела Si/SiO₂; 2) изменение скорости поверхностной рекомбинации.

Поэтому для адекватного моделирования влияния гамма-излучения на характеристики Si БT и SiGe ГБТ в системе TCAD, наряду с уже имеющимися моделями учета изменения объемного заряда в SiO₂ (Q_{ox}), были добавлены физические выражения, описывающие концентрацию ловушек N_{it} на границе раздела Si/SiO₂ в зависимости от поглощенной дозы гамма-излучения D_{γ} :

$$N_{it}(D_{\gamma}) = a_{it} D_{\gamma}^{b_{it}}$$
(2.10)

а также изменение скорости поверхностной рекомбинации S [17]:

$$S(D_{\gamma}) = 1/2 \cdot \sigma \cdot v_{th} \cdot \pi \cdot k_B \cdot T \cdot N_{tt}(D_{\gamma}), \qquad (2.11)$$

где: $\sigma = \sqrt{\sigma_n \cdot \sigma_p}$; σ_n , σ_p – сечение захвата электрона и дырки ловушкой, соответственно; $k_{\rm B}$ – постоянная Больцмана; T – температура; $v_{\rm th}$ – тепловая скорость электрона; a_{ib} , b_{it} – численные коэффициенты.

Для определения скорости рекомбинации необходимо задать концентрацию ловушек на границе раздела Si/SiO₂ для разных уровней поглощенной дозы. Из экспериментальных работ [22], [49] для зависимости концентрация ловушек на границе раздела Si/SiO₂ от поглощенной дозы до уровней $1 \cdot 10^7$ рад были определены значения аппроксимирующих параметров a_{it} , b_{it} , выражении (2.10). Стоить отметь, что значения концентрации ловушек отличаются для разных областей структуры прибора, так в области рпперехода, они больше чем в области щелевой изоляции (см. рис. 2.8).

Из рис. 2.8 видно, что происходит насыщение концентрации ловушек, как в области щелевой изоляции, так и в области выхода на поверхность pn-перехода. Поэтому скорость поверхность рекомбинации S также будет иметь насыщающийся характер в зависимости от поглощенной дозы D_{γ} (см. рис. 2.9), что, в конечном счете, приведет к уменьшению деградации характеристик биполярного транзистора при больших дозах.



Рис. 2.8. Зависимости концентрации ловушек N_{it} на границе раздела Si/SiO₂ от поглощенной дозы D_{γ} в области изоляции, примыкающей к pn-переходу (1) с аппроксимирующими параметрами $a_{it} = 2 \cdot 10^8$ рад⁻¹·см⁻², $b_{it} = 0,61$ и в области щелевой изоляции (2) с аппроксимирующими параметрами $a_{it} = 1 \cdot 10^8$ рад⁻¹·см⁻²,

 $b_{it} = 0,59$



Рис. 2.9. Зависимость скорости поверхностной рекомбинации S от поглощенной дозы D_γ

На рис. 2.10 изображена типичная структура SiGe ГБТ, в которую для учета ионизационных эффектов были добавлены ловушки в области pn-перехода и щелевой изоляции. Образование протяженных зон на рис. 2.10 по периметру границы Si/SiO₂, в которых накапливается заряд на ловушках, приводит к увеличению токов утечки.

Разработанная модель, которая учитывает образование положительного заряда в SiO_2 , накопление ловушек на границе Si/SiO_2 в различных областях, а также изменение скорости поверхностной рекомбинации в зависимости от поглощенной дозы, была добавлена в структуру TCAD. Для учета накопление ловушек на границе Si/SiO_2 и изменения скорости поверхностной рекомбинации в модель поверхностного темпа рекомбинации ции Шокли-Рид-Холла (SRHSurface) были добавлены выражения (2.10) и (2.11).



Рис. 2.10. 2D распределение концентрации ловушек на границе раздела оксидполупроводник для физической модели, учитывающей гамма воздействие до и после облучения с поглощенными дозами 1·10⁶ и 30·10⁶ рад

Перед запуском проекта для заданных поглощенных доз происходит расчет параметров N_{it} и *S*, которые в дальнейшем используются для расчета характеристики биполярного транзистора. Коэффициенты аппроксимации параметров N_{it} и *S* определяются в файле параметров модели поверхностной рекомбинации, что позволяет адаптировать модель для любой структуры. Параметр Q_{ox} рассчитывается с использованием встроенных физических моделей при расчете структуры в переходном режиме (Transient).

С использованием разработанной радиационной модели проведено приборнотехнологическое моделирование различных Si и SiGe биполярных структур. Далее приведен пример использования радиационной модели для SiGe ГБТ, изготовленного по 0,13 мкм технологии SiGe БиКМОП 8WL с $\beta = 250, f_T = 100$ ГГц, $f_{max} = 200$ ГГц [57].

Результаты экспериментальных исследований были получены из работы [41].

На рис. 2.11 приведены характеристика Гуммеля до и после воздействия гаммаизлучения с поглощенными дозами 1·10⁶, 6·10⁶, 30·10⁶ рад.



Рис. 2.11. Характеристика Гуммеля SiGe ГБТ до и после облучения гамма квантами с поглощенными дозами 1·10⁶, 6·10⁶, 30·10⁶ рад

На рис. 2.12 – 2.14 представлены 2D и 1D распределения скорости рекомбинации носителей заряда и объемного заряда, что позволяет оценить влияние накопления заряда вдоль мелкой щелевой изоляции, а также оценить изменение скорости рекомбинации в структуре прибора с целью определения наиболее критичных областей, в которых необходимо минимизировать ионизационные эффекты.

В результате накопления на границе Si/SiO₂ заряда происходит перераспределение носителей заряда к границе раздела Si/SiO₂ (см. рис. 2.14) из-за чего происходит увеличении рекомбинации (см. рис. 2.12 – 2.13), что негативно сказывается на работе транзистора. Уменьшения влияния этих эффектов приведет к повышению радиационной стойкости такой структуры.



Рис. 2.12. 2D распределение скорости рекомбинации носителей в структуре SiGe ГБТ до и после гамма-облучения с суммарной поглощенной дозой 1.10⁶ и 30.10⁶ рад



Рис. 2.13. 1D распределение скорости рекомбинации носителей в коллекторной области с Y= 0,05 мкм



Рис. 2.14. 2D распределение объемного заряда в структуре SiGe ГБТ до и после гамма-облучения с суммарной поглощенной дозой 1·10⁶ и 30·10⁶ рад

Для более точного приборно-технологического моделирования необходимо уточнять и корректировать коэффициенты моделей по экспериментальным исследованиям для конкретной технологии биполярной транзисторной структуры. Так, например, для моделирования Si БT необходимо использовать калибровочные значения для моделей времени жизни и подвижности [51].

Таким образом, в части учета влияния гамма-облучения на электрофизические и электрические характеристики Si и SiGe транзисторов автором решены следующие задачи:

• разработана и встроена в TCAD модель, в физическом виде учитывающая генерацию ловушек N_{it} на границах Si/SiO₂ и увеличение скорости поверхностной рекомбинации *S* в структуре БТ при воздействии гамма-излучения на Si БТ и SiGe ГБТ;
погрешность расчета с помощью разработанной модели статических ВАХ и частотных характеристик современных Si БT и SiGe ГБТ с субмикронными размерами составляет 10-20% в практически важном диапазоне доз гамма-облучения.

• модель встроена в систему приборно-технологического моделирования Sentaurus Synopsys, что позволяет рассчитывать полупроводниковые приборы с учетом воздействия гамма-излучения;

• модель использовалась для исследования и прогнозирования деградации электрофизических и электрических характеристик Si и SiGe биполярных структур, изготовленных по современным технологиям.

2.2 TCAD модель электрофизических параметров, учитывающая влияние нейтронного излучения в структурах Si БT и SiGe ГБТ

Взаимодействие потока нейтронов с веществом происходит посредством трех механизмов: упругое рассеяние на атомах, неупругое рассеяние на ядрах атомов, поглощение ядрами вещества.

В результате при нейтронном облучении создается в локальных областях большое количество вакансий - вакансионные "ядра". Междоузельные атомы уходят из этих областей практически мгновенно на большие расстояния. При этом концентрация вакансий существенно выше концентрации примеси, что приведет к взаимодействию вакансии между собой, образуя дивакансии в малом объеме – дивакансионный объем. Концентрация дефектов за пределами ядра существенно меньше, поэтому более вероятны процессы взаимодействия вакансий и примесных атомов с образованием соответствующих комплексов [3].

Часть междоузельных атомов кремния при своем движении из области каскада также может взаимодействовать с чужеродными атомами, находящимися в узлах, вытесняя их в междоузлия и занимая их место. Вытесненные атомы примеси могут образовывать комплексы дефектов с оставшимися в узлах атомами примеси. Таким образом, дивакансионное ядро будет окружено как бы оболочкой из рассмотренных ранее комплексов (см. рис. 2.15).



Рис. 2.15. Модель кластера

Рассмотренные радиационные дефекты (точечные дефекты и разупорядоченные области) являются эффективными центрами удаления носителей, центрами рекомбинации и центрами рассеяния.

Поэтому в результате образования разупорядоченных областей происходит изменение подвижности свободных носителей заряда, концентрации основных носителей заряда и времени жизни неравновесных носителей заряда [45], [53]. Уменьшение подвижности свободных носителей заряда является эффектом третьего порядка малости и в практически интересующих случаях этой зависимостью можно пренебречь. Изменение эффективной концентрации легирующей примеси с облучением можно считать эффектом второго порядка малости на фоне изменения времени жизни, и его следует учитывать лишь при достаточно низком уровне легирования [52] (см. рис. 2.16), что не характерно для рассматриваемых в диссертационной работе типов транзисторов. Таким образом, наиболее чувствительным параметром при облучении нейтронами является время жизни неравновесных носителей заряда [53].

Изменение времени жизни неравновесных носителей заряда при облучении нейтронами описывается выражением:

$$\frac{1}{\tau_{\Phi}} = \frac{1}{\tau_0} + \Phi \cdot K_{\tau}, \qquad (2.12)$$

где: τ_{Φ} - время жизни после облучения, τ_0 - время жизни до облучения, Φ - флюенс нейтронов, K_{τ_1} - коэффициент радиационного изменения времени жизни.



Рис. 2.16. Зависимость концентрации носителей заряда от интегрального потока нейтронов

Основной проблемой модели учета радиационных эффектов в TCAD для прогнозирования радиационной стойкости биполярных структур при воздействии нейтронного излучения является выбор параметра K_{τ} . В большинстве работ K_{τ} определяется из эмпирических выражений Грегори [54]. В этой работе эмпирическим путем были определенны величины $1/K_{\tau}$ при разном уровне инжекции после облучения нейтронами с энергией $E_{\rm H} = 1,4$ МэВ для кремниевых образов (солнечных батарей) с различной степенью легирования и типа примеси. На основании полученных данных, авторами работы была предложена эмпирические зависимости $1/K_{\tau}$ от нейтронного облучения кремния от уровня инжекции, которые определяемая следующими выражениями:

для n-Si:

$$\frac{1}{K\tau} \left(\frac{H \cdot c}{cM^2}\right) = 4 \cdot 10^4 + 5,76 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{p}{n}\right)^{0,534}; \qquad (2.13)$$

для p-Si:

$$\frac{1}{K\tau} \left(\frac{H \cdot c}{cM^2}\right) = 2,5 \cdot 10^5 + 5,55 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{n}{p}\right)^{0,395},$$
(2.14)

где: n, p – концентрация свободных носителей заряда.

При этом в ряде работ [54], [55], [56] наблюдается существенное несовпадение с экспериментальными значениями при разных степенях легирования, в особенности для

материала с Р – типом проводимости. Однако в экспериментальных исследованиях [54] и [55] отсутствуют данные по величинам K_{τ} для высокоомного материала при низком уровне инжекции, а также для низкоомного материала при высоком уровне инжекции.

Такие исследования были проведены в работе [56], где также показано, что величина K_{τ} при нейтронном облучении зависит от степени легирования материала, и не зависит от содержания кислорода (см. рис. 2.17).



Рис. 2.17. Зависимость величины K_т от удельного сопротивления кремния, при низком уровне инжекции

Поэтому основным недостатком модели Грегори является отсутствие зависимости *К*_т от концентрации легирующей примеси. Авторами работы [56] предложены уточняющие выражения, которые также основываются на анализе совокупности экспериментальных результатов, но учитывают не только влияние уровня инжекции, но и реальную концентрацию основных носителей заряда облучаемого материала:

для п-типа:

$$K_{\tau} = a + b \cdot \left[\ln \left(\frac{n_{\mu e o c \mu} + n_i}{n_{o c \mu}} \right) \right]^2 + c \cdot \ln \left(\frac{N_{o c \mu}}{n_i} \right) \cdot \left[\ln \left(\frac{d}{\delta} + 1 \right) \right]^{0.5};$$
(2.15)

для р-типа:

$$K_{\tau} = a + f \cdot \ln\left(\frac{N_{ocH}}{m}\right) \cdot \left[\ln\left(\frac{n_{HeOCH} + n_i}{n_{oCH}}\right)\right]^2, \qquad (2.16)$$

где: N_{осн} – концентрация легирующей примеси; *n_i*-собственная концентрация носителей заряда, *n_{och}*, *n_{heoch}* – концентрация основных и неосновных носителей заряда.

Зависимости *K*_т от уровня инжекции приведены на рис. 2.18, 2.19 для N – кремния и рис. 2.20 для P – кремния вместе с экспериментальными данными для широкого диапазона концентраций основных носителей.



Рис. 2.18. Зависимость коэффициента K_{τ} от уровня инжекции в N – кремнии: 1, 2 – расчет по формуле (2.15) с $N_{och} = 5,0\cdot10^{14}, 1,0\cdot10^{16}$ см⁻³, соответственно; 3, 4 – экспериментальные точки для $N_{och} \approx 5,0\cdot10^{14}, 0,85\cdot10^{16}$ см⁻³, соответственно



Рис. 2.19. Зависимость коэффициента K_{τ} от уровня инжекции в N – кремнии: 1, 2, 3 – расчет по формуле (2.15) с $N_{och} = 5,0\cdot10^{13}, 1,0\cdot10^{16}, 1,0\cdot10^{17}$ см⁻³, соответственно; 4, 5, 6, 7, 8 – экспериментальные точки для $N_{och} = 4,22\cdot10^{13}, 5,5\cdot10^{13}, 0,85\cdot10^{16}, 1,86\cdot10^{16}, 2,58\cdot10^{16}$ см⁻³, соответственно



Рис. 2.20. Зависимость коэффициента K_{τ} от уровня инжекции в Р – кремнии: 1, 2, 3 – расчет по формуле (2.16) с $N_{och} = 1,0\cdot10^{14}, 1,0\cdot10^{16}, 1,0\cdot10^{17}$ см⁻³, соответственно; 4, 5, 6, 7 – экспериментальные точки для $N_{och} = 1,08\cdot10^{14}, 2,57\cdot10^{14}, 1,65\cdot10^{15}, 9,73\cdot10^{15}$ см⁻³, соответственно

В связи с тем, что в современных СВЧ Si и SiGe транзисторах активная база достаточно сильно легирована ($10^{17} \div 10^{19}$ см⁻³), то для моделирования нейтронного излучения была выбрана улучшенная модель, в которой введена зависимость K_{τ} от концентрации легирующей примеси [56].

Для моделирования электрических характеристик Si БT и SiGe ГБT с учетом влияния нейтронного излучения в исходный код модели рекомбинации Шокли-Рид-Холла в TCAD с использованием программного физического интерфейса (physical model interface — PMI) в выражения для расчета времени жизни носителей заряда были добавлены следующие модели: 1) улучшенная модель с выражениями (2.12), (2.15) – (2.16); 2) модель Грегори с выражениями (2.12), (2.13)-(2.14). Наряду с радиационными эффектами разработанная модель "SRH (pmi_lifetime)" учитывает зависимость времени жизни от концентрации легирующей примеси и температуры, что позволяет проводить моделирование с учетом различных температурных эффектов, что важно для SiGe ГБТ. Однако стоить отметить, что моделирование SiGe ГБТ при повышенных температурах ограничивается определением зависимости K_{τ} от температуры, которая в настоящее время не известна.

Радиационная модель должна учитывать уровень инжекции и тип проводимости материла, которые зависят от его режима работы и структуры прибора. Алгоритм работы модели учета радиационных эффектов при воздействии нейтронного излучения приведен на рис. 2.21.

Для определения типа проводимости кремния вводится условие: если параметр р, который определяется как отношение концентрации акцепторной и донорной примеси, ≤ 1, то это n-тип проводимости, в противоположном случае p-тип.

После определения типа проводимости выбирается выражение для K_{τ} , по которому далее проводиться расчет по соответствующей формуле в узле сетки. Коэффициент инжекции, определяется как отношение неосновных носителей заряда к основным, и рассчитывается каждый раз при изменении режима работы прибора для каждого узла сетки.

Время жизни τ_0 определяется в зависимости от распределения легирующей примеси и температуры, что особенно важно для моделирования SiGe транзисторов, которые очень чувствительны к температурным эффектам.

43

Данный алгоритм реализован в программе, написанной на языке C/C++. При необходимости внесения изменений в исходный код программы (к примеру, для уточнения параметров модели рекомбинации) можно использовать параметры для модели рекомбинации Шокли-Рид-Холла в файле параметров, что существенно упрощает работу с радиационной моделью.



Рис. 2.21. Алгоритм работы радиационной модели учета влияния нейтронного излучения

С помощью разработанной модели радиационных эффектов при воздействии нейтронного излучения можно исследовать изменение различных электрофизических параметров полупроводниковых приборов, например, время жизни, время релаксации, подвижности и т.п. Это позволяет использовать данную САПР для более широкого круга задач, чем в базовой комплектации.

Для настройки модели был использован транзистор 2Т378 с коэффициентом усиления по току $\beta = 70$, граничной частотой $f_{\rm T} = 1,9$ ГГц и максимальной частотой $f_{\rm max} = 5,1$ ГГц. После чего проводились исследования разных Si и SiGe структур на радиационную стойкость при воздействии нейтронного излучения. Далее представлены результаты исследования Si БТ 2Т378 и SiGe ГБТ, изготовленного по 0,13 мкм технологии 8WL БиКМОП с $\beta = 250, f_{\rm T} = 100$ ГГц, $f_{\rm max} = 200$ ГГц [57].

Измерение электрических характеристик и облучение Si БТ 2Т378 проводились автором на выборке транзисторов из 5-ти приборов. Характеристики Si БТ 2Т378 были измерены до облучения, после чего выборка транзисторов подверглась облучению нейтронами, которое проводилось на импульсном ядерном реакторе БАРС-4 с энергией 1,25 МэВ в Научно-исследовательском институте приборов (ФГУП «НИИП»). Импульсный ядерный реактор имеет металлическую активную зону, которая используется как интенсивный источник гамма- и нейтронного излучения для исследований радиационной стойкости радиоэлектронной аппаратуры. Средняя мощность реактора 1 кВт, пиковая мощность в импульсе $1,4\cdot10^8$ кВт. Облучение биполярных транзисторов проводилось для дискретного набора потоков нейтронов Φ_n в диапазоне от $1\cdot10^{12}$ до $4\cdot10^{13}$ см⁻². Погрешность измерения потока нейтронов составляет не более 15%. Для исключения сопутствующего гамма-излучения реактора, необходимо проводить дополнительные исследования на реакцию транзисторов на воздействие гамма-излучения.

В связи с тем, что после облучения остается наведенная активность на образцах и в помещении, где установлен реактор, после очередного цикла облучения нет возможности провести измерения непосредственно на месте. Поэтому измерения проводились после снижения наведённой активности.

Для исследования влияния нейтронного излучения на электрофизические параметры транзистора Si БТ 2Т378 в TCAD была воссоздана его структура.

На рис. 2.22 – 2.24 представлены сравнение скорости рекомбинации и подвижности электронов в структуре транзистора 2Т378 без учета и с учетом воздействия нейтронного излучения с уровнем интегрального потока $4 \cdot 10^{13}$ см⁻². Видно, что скорость рекомбинации существенно возрастает в структуре Si БT при облучении. При этом подвижность электронов при облучении в базовой области возрастает, но уменьшается в коллекторной области Si БT (см. рис. 2.24).



Рис. 2.22. 2D распределение скорости рекомбинации в структуре транзистора 2Т378 без учета (а) и с учетом (б) воздействия нейтронного излучения с интегральным потоком 4·10¹³ см⁻²



Рис. 2.23. 1D распределение темпа рекомбинации в структуре транзистора 2T378

по сечению Х-Х (а) и Ү-Ү (б)



Рис. 2.24. 1D распределение подвижности в структуре транзистора 2Т378 по

сечению Х-Х

46

Таким образом, для уменьшения рекомбинационных потерь в базе транзистора, которые существенно возрастают при облучении нейтронами, необходимо увеличивать концентрацию легирующей примеси в базе и уменьшать толщину активной базы, так как это приведет к уменьшению темпа рекомбинации.

Пример использования модели учета влияния нейтронного излучения на структуру SiGe ГБТ (см. рис. 2.25), изготовленного по 0,13 мкм технологии 8WL БиКМОП с $\beta = 250, f_T = 100 \Gamma \Gamma \mu, f_{max} = 200 \Gamma \Gamma \mu [57],$ приведен на рис. 2.25 и 2.26. С помощью двух типов выражений для коэффициента K_{τ} : 1) Грегори; 2) улучшенной модели (см. рис. 2.26) Для сравнения экспериментальных и смоделированных результатов был определен фактор повреждения:

$$d_n = \beta(\Phi_n) / \beta(0) \tag{2.17}$$

где: $\beta(\Phi_n)$ и $\beta(0)$ – коэффициенты усиления после и до облучения, соответственно.



Рис. 2.25. Структура SiGe ГБТ IBM





от интегрального потока нейтронов для двух типов моделей

Из рис. 2.26 видно, что выражения Грегори (2.13)-(2.14) дают существенные расхождения (более 40%) между экспериментальными и смоделированными результатами, тогда как улучшенная модель (2.15)-(2.16) дает не более 10%.

Для SiGe ГБТ также моделировались частотные характеристики. Во многих работах указывается, что деградация граничной и максимальной частоты SiGe ГБТ незначительно [58].

Результаты моделирования граничной и максимальной частоты усиления SiGe HBT 8WL после воздействия нейтронного излучения с уровнем интегрального потока более 10^{15} см⁻², приведенные на рис. 2.27, подтверждают данное утверждение.

Исследования радиационной стойкости SiGe HBT 8WL с использованием разработанной модели показали, (см. рис. 2.26), что данный транзистор является радиационно-стойким к нейтронному излучению. При уровне интегрального потока 10^{15} см⁻² деградация максимума коэффициента усиления потока составляет менее 40%. А при уровне интегрального потока не более $5 \cdot 10^{15}$ см⁻² пик коэффициента усиление по току находится в диапазоне от 80 до 100.



a)



Рис. 2.27. Граничная (а) и максимальная (б) частота усиления SiGe HBT 8WL до и после воздействия нейтронного излучения с уровнями интегрального потока не более 5·10¹⁵ см⁻²

Таким образом, подводя итог результатам, полученным в данном разделе диссертации, посвященном разработке TCAD модели для учета нейтронного облучения на характеристики Si БT и SiGe ГБТ структур, можно сделать следующие выводы:

 разработана модель, в физическом виде учитывающая влияние структурных дефектов, уровня инжекции неосновных носителей заряда и уровня легирования активных областей на основной электрический параметр БТ – время жизни (τ_n, τ_p) при воздействии интегрального потока нейтронов;

2. погрешность моделирования статических ВАХ и частотных характеристик Si БT и SiGe ГБТ не превышает 10-20% в практически важном диапазоне флюенсов нейтронов;

3. модель встроена в современную систему приборно-технологического моделирования Sentaurus Synopsys, что позволяет использовать ее для расчета и проектирования Si БT и SiGe ГБТ, подвергнутых воздействию нейтронов;

4. модель использовалась в составе TCAD для исследования радиационной стойкости Si БT и SiGe ГБТ, изготовленных по современным технологиям.

Приведенные выше результаты получены впервые и отечественных и зарубежных аналогов не имеют.

49

2.3 TCAD модель, учитывающая влияние структурных и ионизационных эффектов в структурах Si БT и SiGe ГБТ при воздействии протонов

При воздействии протонного излучения на полупроводниковые материалы с широким диапазоном энергий от единиц МэВ до 10³ МэВ взаимодействие протонов с атомами вещества происходит посредством: электромагнитного взаимодействия с электронами среды; электромагнитного взаимодействия с ядрами среды; упругого рассеяния на ядрах среды; неупругого взаимодействия с ядрами среды. В результате совместного действия перечисленных четырех механизмов влияние протонного излучения может быть разложено на две составляющие: ионизационную и структурную.

Поэтому в структуре Si БT и SiGe ГБТ при воздействии протонного излучения происходит изменение основных электрофизических параметров в результате влияния ионизационных и структурных эффектов [59]. Таким образом, прогнозирование деградации электрофизических параметров и электрических характеристик Si БT и SiGe ГБТ при воздействии протонного излучения может быть выполнено путем совместного использования частных моделей, учитывающих структурные и ионизационные эффекты [60].

На практике при проведении физических экспериментов воздействие протонного излучения заменяется совокупным воздействием нейтронного и гамма-излучения. При этом нейтронное излучение используется для образования эффектов смещения [61], а гамма-излучение используется для создания ионизационных эффектов [62], [63].

При разработке математической модели, учитывающей влияние протонного излучения, был использован аналогичный подход. Для учета деградации характеристик Si БT и SiGe ГБT, вызванных дефектами смещения, использовалась ранее разработанная модель для учета влияния нейтронного излучения [64]. Для учета деградации характеристик Si БT и SiGe ГБT, вызванных ионизационными эффектами использовалась модель для гамма-излучения [65]. Эти модели используются в совокупности с методикой определения доз гамма-излучения и потоков нейтронов, эквивалентных воздействию протонного излучения.

Для проведения приборно-технологического моделирования Si БT и SiGe ГБT с учетом влияния протонного излучения необходимо: 1) подключить радиационную модель учета структурных дефектов (частная модель для нейтронного излучения) и определить эквивалентный поток нейтронов Φ_n , который создает такое же количество дефектов смещения, как и протонного излучение Φ_p ; 2) подключить радиационную модель учета ионизационных эффектов (частная модель для гамма-излучения) и определить поглощенную дозу D_{γ} после гамма-облучения, эквивалентную поглощенной дозе D_p после воздействия протонного излучения. Для определения эквивалентного потока нейтронов используется следующее выражение:

$$\Phi_n = K_{cp} \cdot \Phi_p \tag{2.18}$$

где: $K_{cp} = \delta_{cn}(E) / \delta_{cp}(E)$; $\delta_{cn}(E)$, $\delta_{cp}(E)$ – удельная поглощенная доза для нейтронного и протонного излучения в зависимости от энергии (см. рис. 2.28).



Рис. 2.28. Удельная поглощенная доза в Si для нейтронного и протонного излучения для разных энергий частиц [66]

Для определения эквивалентной дозы гамма-излучения используется следующее выражение:

$$D_{p} = \delta_{ip}(E) \cdot \Phi_{p}, \qquad (2.19)$$

где: δ_{ip} (*E*) – удельная поглощенная доза в расчете на один протон (см. рис. 2.29).

Моделирование влияния протонного излучения на характеристики биполярных транзисторов начинается с задания уровня поглощенной дозы от воздействия протонного излучения с определенной энергией, после чего происходит расчет эквивалентного потока нейтронов и эквивалентной дозы гамма-излучения. При этом нужно учитывать вклад нейтронного излучения в суммарную поглощенную дозу. На следующем шаге происходит расчет значения скорости поверхностной рекомбинации для данной поглощенной дозы для модели гамма-излучения. Далее проводится электрофизическое моделирование структуры Si БT и SiGe ГБT с учетом структурных и ионизационных эффектов.



Рис. 2.29. Удельная поглощенная доза в Si для альфа-частиц (1), протонов (2), электронов (3), нейтронов (4) и фотонов (5) с разной энергией [67]

Стоит отметить, что такой подход позволяет проводить исследования влияния отдельно структурных дефектов и отдельно ионизационных эффектов на электрические характеристики Si БT и SiGe ГБТ.

На рис. 2.30 приведены 2D и 1D распределения темпа рекомбинации в структуре SiGe ГБТ при воздействии протонного излучения. Из рисунка видно, что после воздействия флюенса нейтронов $\Phi_n = 6 \cdot 10^{13}$ см⁻² существенно возрастает темп рекомбинации в базе транзистора, что является следствием структурных повреждений.



Рис. 2.30. 2D (а) и 1D (сечение при X = 0.0 мкм) (б) распределение темпа рекомбинации для SiGe ГБТ после облучения протонами (структурные повреждения)

На рис. 2.31 – 2.33 представлены изменения в структуре SiGe ГБТ при воздействии протонного излучения, вызванные ионизационными эффектами, а именно 2D распределения концентрации ловушек на границе раздела Si/SiO₂ (см. рис. 2.31), пространственного заряда (см. рис. 2.33) и концентрации заряда в SiO₂ (см. рис. 2.32).

Из рис. 2.31 видно, что при увеличении поглощенной дозы увеличивается концентрация ловушек на границе Si/SiO_2 , что является одним из факторов влияния ионизирующей составляющей, которая влияет на перераспределение носителей в объеме полупроводника (см. рис. 2.33).

Другим фактором ионизирующей составляющей является накопление положительного заряда в SiO₂. В таблице 2.1 приведены значения максимального уровня концентрации заряда в оксиде.

Таблица 2.1. Концентрации положительного заряда в SiO₂ структуры SiGe ГБТ после облучения протонами (ионизационные эффекты)

Суммарная поглощенная до- за, рад	0	$1 \cdot 10^{6}$	10.10^{6}
Концентрации положитель- ного заряда в SiO_2 Q_{ox_MAX} , см ⁻³	0	5,5·10 ¹⁷	1,6·10 ¹⁸







Рис. 2.32. 2D распределение концентрации положительного заряда в SiO₂ структуры SiGe ГБТ после облучения протонами (ионизационные эффекты)



Рис. 2.33. 2D распределение пространственного заряда для SiGe ГБТ после облучения протонами (ионизационные эффекты)

Третьим фактором, обусловленным действием ионизирующей составляющей, является увеличении скорости поверхностной рекомбинации при увеличении уровня поглощенной дозы, что влияет на темп поверхностной рекомбинации (см. рис. 2.34) и приводит к увеличению рекомбинационного тока базы.



Рис. 2.34. 2D распределение темпа поверхностной рекомбинации для SiGe ГБТ после облучения протонами (ионизационные эффекты)

В таблице 2.2 приведены максимальные значения темпа поверхностной рекомбинации при разных поглощенных дозах при воздействии протонного излучения.

Таблица 2.2. Темп поверхностной рекомбинации в структуре SiGe ГБТ после облучения протонами (ионизационные эффекты)

Суммарная по- глощенная доза, рад	0	$1 \cdot 10^{6}$	10·10 ⁶
Темп поверх- ностной реком- бинации в SiO ₂ S _{0 MAX} , см ^{-2} ·c ^{-1}	0	6,6·10 ²³	$9,4\cdot 10^{23}$

В связи со сложностью проведения испытаний на протонных ускорителях сравнение результатов моделирования BAX SiGe ГБТ с экспериментом проводилось с использованием данных, полученных из зарубежной литературы.

Для исследования радиационной стойкости к протонному воздействию был выбран SiGe ГБТ, изготовленный по 0,18 мкм БиКМОП технологии 7HP с β = 250, f_T = 120 ГГц, f_{max} = 100 ГГц. Структура SiGe ГБТ приведена на рис. 2.35 [68].



Рис. 2.35. Структура SiGe ГБТ IBM [68]

На первом этапе проводилось моделирование 2D-структуры SiGe ГБТ в Synopsys Sentaurus, а также расчет и сравнение результатов моделирования статических ВАХ для необлученного транзистора с экспериментальными данными. На следующем этапе проводилось сравнение смоделированных и экспериментальных данных после воздействия протонного излучения с разными интегральными потоками.

Сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования представлено на рис. 2.36, на котором приведены характеристики Гуммеля (а) и коэффициент усиления по току (б) до и после воздействия потоков протонов $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, $7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ с энергией 63,3 МэВ [68].



Рис. 2.36. Сравнение смоделированных (линии) и экспериментальных данных (точки) [68] характеристик Гуммеля (а) и коэффициента усиления по току (б) SiGe ГБТ до и после воздействия протонного излучения с интегральными потоками 1·10¹² см⁻², 7·10¹² см⁻², 2·10¹³ см⁻², 5·10¹³ см⁻²

Для исследования влияния протонного излучения на характеристики SiGe ГБТ была определена разница ΔJ_6 между плотностями тока базы при напряжении $U_{69} = 0,7$ В до J_{6_0} и после $J_{6_{pad}}$ облучения протонами. На рис. 2.37 показано сравнение экспериментального и смоделированного ΔJ_6 , а также его ионизационной и структурной составляющих.

При этом для более точного моделирования параметры улучшенной модели (2.15) – (2.16) были уточнены по экспериментальным данным для структур SiGe ГБТ (см. таблицу 2.3 и 2.4).

Таблица 2.3. Коэффициенты Кт_п для n-типа материала (2.15)

Коэффициент К $ au_n$	а, см ² /с	b, см ² /с	с, см ² /с	d
для n-типа материала				
Для SiGe ГБТ [65]	$3,1\cdot 10^{-7}$	9,0·10 ⁻⁸	$1,0.10^{-5}$	$5,0.10^{-5}$
Для Si БТ [64]	1,8.10 ⁻⁷	8,8.10-8	4,0.10 ⁻⁷	$4,5 \cdot 10^{-5}$

Таблица 2.4. Коэффициенты Кτ_р для р-типа материала (2.16)

Коэффициент Кт _р для n-типа материала	e, см ² /с	f, см ² /с	m, см ² /с
Для SiGe ГБТ [65]	$3,10\cdot 10^{-7}$	$1,05 \cdot 10^{-8}$	$4,12 \cdot 10^{12}$
Для Si БТ [64]	$1,80 \cdot 10^{-7}$	$7,05 \cdot 10^{-9}$	$4,12 \cdot 10^{12}$



Рис. 2.37. Радиационно-индуцированная плотность тока базы SiGe ГБТ после

воздействия протонного излучения

Как видно из рис. 2.37, увеличение ΔJ_{δ} после облучения протонами при низких значениях интегрального потока нейтронов в основном определяется ионизационными эффектами. Структурные дефекты вносят соизмеримый с ионизационными эффектами вклад в увеличение ΔJ_{δ} при высоких значениях интегральных протоков протонов.

Пригодность разработанной модели для учета радиационного воздействия на SiGe ГБТ с высокой ~200 МэВ и низкой менее 2,0 МэВ энергией протонов была проведена на приборе компании IBM, изготовленном по технологии 5HP с характерными параметрами: ширина эмиттера $W_e = 0,42$ мкм, коэффициент усиления $\beta = 110$, граничная частота $f_T = 50$ ГГц, максимальная частота $f_{max} = 90$ ГГц.

Сравнение результатов моделирования ВАХ, полученных с использованием моделей учета радиационных эффектов от действия протонного излучения, и данных эксперимента, полученные из работы [69], приведено на рис. 2.38, 2.39, 2.41, 2.42. На рис. 2.38 приведено сравнение характеристик Гуммеля SiGe ГБТ до и после воздействия протонов с энергий 198 МэВ. Точками на графике изображены экспериментальные данные, сплошной линией результаты моделирования до облучения и пунктирной линией результаты моделирования с учетом радиационного воздействия потоком протонов 5·10¹³ пр./см².



Рис. 2.38. Характеристика Гуммеля SiGe ГБТ до и после об лучения протонами с энергией 198 МэВ

На рис. 2.39 приведено сравнение экспериментальных и смоделированных характеристик Гуммеля SiGe ГБТ до и после воздействия протонов с энергией 1,75 МэВ. Точками также указаны экспериментальные данные, полученные из работы [69]. А сплошной и пунктирной линией изображены результаты моделирования до и после облучения для разных значений потока протонов, соответственно.



Рис. 2.39. ВАХ SiGe ГБТ до и после об лучения протонами с энергией 1,75 МэВ

Как видно из рис. 2.38 и 2.39, более сильное изменение тока базы происходит при облучении потоком протонов с малой энергией. Это связано с тем, что при уменьшении энергии протона возрастает сечение взаимодействия, что приводит к увеличению образования дефектов и эффективности ионизации, что и приводит к более сильной деградации характеристик транзистора [70].

На рис. 2.41 приведены зависимости коэффициента усиления от плотности тока коллектора. На рис. 2.41, (а) представлено сравнение результатов моделирования и экспериментальные данные после воздействия протонов с высокой энергией для разных потоков, а на рис. 2.41, (б) для случая воздействия низкоэнергичными протонами.



Рис. 2.40. Зависимость сечения взаимодействия от энергии протона

Точками показаны экспериментальные данные, а линией обозначаются результаты моделирования.



Рис. 2.41. Зависимость коэффициента усиления от тока коллектора для разных значений потока протонов: а) высокоэнергичные с энергией 198 МэВ; б) низкоэнергичные с энергией 1,78 МэВ

На рис. 2.42 приведены зависимости граничной частоты от тока коллектора. На рис. 2.42 (а) приведена зависимость для результатов моделирования до и после воздействия протонов с высокой энергией, а на рис. 2.42 (б) с низкоэнергичными протонами. Поток протонов для обоих случаев 1.10¹⁴ пр./см².



Рис. 2.42. Зависимости граничной частоты от тока коллектора до и после воздействия протонов с энергией 198 МэВ (а) 1,78 МэВ (б)

Из рис. 2.42 также видно, что изменения частоты f_t происходят только при облучении низкоэнергичными протонами.

Из анализа результатов расчетов и экспериментов, приведенных на 2.38, 2.39, 2.41, 2.42 для одного и того же SiGe ГБТ, наглядно видно, что при воздействии одних и тех же потоков протонов, малоэнергичные протоны с энергией менее 2,0 МэВ вызывают гораздо большую деградацию статических и частотных параметров транзистора, чем высокоэнергичные протоны с энергией 198 МэВ. Что полностью согласуется с результатами отечественных и зарубежных работ [69].

В целом, оценивая результаты, полученные с помощью модели, учитывающей совместное действие структурных и ионизационных эффектов в структурах Si БT и SiGe ГБТ при воздействии протонов с низким (не более 2,0 МэВ), средним (63,3 МэВ) и высоким (198 МэВ) уровнем энергии, можно заключить, что она обеспечивает необходимую для практических применений точность (погрешность не выше 10-20%) для Si и SiGe транзисторов, изготовленных по современным субмикронным технологиям, в диапазоне доз до $5 \cdot 10^6$ рад и интегральных потоков до $1 \cdot 10^{16}$ см⁻². Разработанная в диссертации модель, учитывающая совместное действие структурных и ионизационных эффектов при воздействии протонного излучения, предложена и реализована в TCAD впервые и отечественных и зарубежных аналогов не имеет.

2.4 Выводы по главе 2

Результатами исследований, приведенных в главе 2, являются:

1) разработана модель, в физическом виде учитывающая генерацию ловушек N_{it} на границах Si/SiO₂ и увеличение скорости поверхностной рекомбинации *S* в структуре Si БT и SiGe ГБТ при воздействии гамма-излучения, что существенно повышает точность моделирования;

2) разработана модель, в физическом виде учитывающая влияние структурных дефектов, уровня инжекции неосновных носителей заряда и уровня легирования активных областей на основной электрический параметр биполярной структуры – время жизни (τ_n , τ_p) при воздействии интегрального потока нейтронов, что впервые позволило с достаточной точностью расчетным путем оценить воздействие нейтронов на электрические характеристики Si БT и SiGe ГБТ;

3) разработана модель, учитывающая совместное влияние структурных и ионизационных эффектов, обусловленных действием протонов, на электрофизические и электрические характеристики Si БT и SiGe ГБТ. Модель включает в себя частные модели для нейтронного (п. 1) и гамма-излучений (п. 2) в сочетании с методикой определения для них флюенса и дозы, эквивалентных воздействию протонов с определенной энергией. Предложенная модель впервые позволяет с достаточной точностью оценить воздействие протонов на электрические характеристики Si БT и SiGe ГБТ;

 разработанные радиационные модели электрофизических эффектов встроены в промышленный вариант TCAD Sentaurus Synopsys и могут быть использованы для проектирования радиационно-стойких Si БT и SiGe ГБТ, позволяя прогнозировать их электрические характеристики при воздействии нейтронного, протонного и гаммаизлучений;

5) разработанные автором модели были использованы для исследования деградации характеристик и параметров современных Si БT и SiGe ГБТ при воздействии нейтронного, протонного и гамма-излучения. По опыту использования моделей учета радиационных эффектов, погрешность описания статических BAX субмикронных Si БT и SiGe ГБT не превышает 10–15% в широком диапазоне доз до $5 \cdot 10^6$ рад и интегрального потока до 1·10¹⁶ см⁻², динамических характеристик фрагментов – 15-20% в том же диапазоне доз и потоков;

6) увеличение времени моделирования с использованием разработанных моделей по сравнению со стандартными моделями TCAD составляет не более 20%, что практически не вносит дополнительных ограничений на выполнение приборнотехнологических расчетов.

Глава 3 Унифицированная SPICE-макромодель Si/SiGe биполярного транзистора, учитывающая влияние радиационных эффектов

3.1 Общий подход к разработке радиационных SPICE-моделей Si/SiGe БТ

Одним из важных сегментов рынка радиационно-стойких ИС и БИС являются цифровые и аналоговые ИС и БИС, которые содержат на полупроводниковом кристалле субмикронные Si БТ и SiGe ГБТ.

Как следствие, схемотехник ИС и БИС должен иметь в своём распоряжении библиотеку SPICE-моделей БТ, которая включает в себя модели субмикронных Si БТ и Si-Ge ГБТ, учитывающие радиационные эффекты.

Метод учёта дополнительных эффектов. SPICE-модели БТ, учитывающие радиационные эффекты, большинством авторов создавались и дорабатывались с использованием комбинации двух методов: макромоделирования (включения в эквивалентную схему дополнительных элементов), а также введения в модель аппроксимирующих выражений для параметров базовой SPICE-модели, зависящих от внешних воздействующих факторов. Эффективность описанного подхода для учёта радиационных эффектов при воздействии различных видов радиации подтверждена примерами его использования при проектировании радиационно-стойких схем [71]-[79] и др.

Методика создания SPICE-RAD-макромодели заключается в следующем:

1) за основу макромодели берется любая стандартная схемотехническая модель (называемая далее базовой моделью макромодели), которая входит в составе библиотек SPICE-моделей систем схемотехнического проектирования, которая описывает все необходимые эффекты в структуре транзистора до облучения;

2) ряд параметров базовой модели задаются в виде выражений, зависящих от величины радиационного воздействия (поглощенная доза для электронного, протонного и гамма-излучений и интегральный поток для нейтронного излучения);

3) в эквивалентную схему биполярного транзистора подключается дополнительная подсхема, состоящая из стандартных схемотехнических элементов (источников тока, напряжения, диодов и т.п.), для учета радиационных эффектов, которые не могут быть учтены с использованием выражений для параметров базовой модели. Макромодельный подход позволяет достаточно просто включать в SPICE-модель ряд дополнительных эффектов, которые ранее не учитывались, а именно, эффект усиления радиационной деградации параметров от влияния «горячих» носителей и эффект сдвига выходных коллекторных характеристик в области насыщения и лавинного пробоя [78].

Базовые схемотехнические модели. В основе макромодели биполярных транзисторов может использоваться *любая* стандартная схемотехническая SPICE-модель (GP, VBIC, MEXTRAM и т.д.). Выбор базовой схемотехнической модели для моделирования осуществляется путем определения эффектов, которые необходимо учитывать при схемотехническом моделировании фрагментов или БИС в целом до облучения. Во всех SPICE-моделях биполярных транзисторов может быть реализован учет основных дозовых эффектов при статическом воздействии проникающей радиации от различных видов радиации. Исключение составляют только некоторые версии модели Гуммеля-Пуна, для которых нет возможности учитывать эффект сдвига коллекторных характеристик в области пробоя, так как в них изначально отсутствует данный эффект.

В известных работах для каждого вида радиации разрабатываются своя схемотехническая SPICE-RAD-модель транзистора, со своей эквивалентной схемой, системой параметров и методикой их определения из результатов эксперимента. Для построения SPICE-модели широко используется макромодельный подход [27], [31], [28], [33]-[37], [39]-[41].

Предлагаемая автором унифицированная SPICE-RAD-макромодель основана на модели, разработанной в МИЭМ [28], и доработана для современных Si БT и SiGe ГБТ. Предлагаемая SPICE-макромодель расширяет возможности использования ранее разработанной модели [28] с учетом всех видов радиационного излучения и позволяет ее использовать для разных базовых моделей (VBIC, MEXTRAM, HiCUM и т.п.), также предложена единая методика экстракции радиационно-зависимых параметров для всех типов излучения.

Аналогичный подход описан в работе [34], где для учета радиационных эффектов добавляются дополнительные источники тока и напряжения, позволяя моделировать биполярные транзисторы с учетом влияния некоторых радиационных эффектов. Однако, предложенные выражения с большой погрешностью описывают изменения тока коллектора в режиме насыщения на выходных характеристиках, а именно наблюдаются

отрицательные значения токов при малых напряжениях коллектор-эмиттер при учете поглощённой дозы гамма-излучения. Кроме того, не учитывается эффект сдвига коллекторных характеристик в области лавинного пробоя. Учитывается только влияние гаммаизлучения на характеристики БТ и не рассматриваются другие виды излучения.

В структурах биполярных транзисторов, подвергнутых нейтронному, протонному, электронному и гамма-излучению, в результате ионизационных и структурных эффектов возникает дополнительный радиационно-индуцированный поверхностный и объемный ток, что приводит к увеличению тока базы, уменьшению коэффициента усиления по току, изменению напряжения при котором начинается лавинный пробой, что особенно важно для SiGe ГБТ с малыми пробивными напряжениями около единиц вольт. Кроме того, происходит изменение дифференциального сопротивления коллектора, что влияет на ток коллектора в режиме насыщения.

Поэтому для унификации SPICE-макромодели автором было предложено добавить дополнительные схемные элементы, параметры которых должны зависеть от дозы или потока. А сами дополнительные схемные элементы должны учитывать следующие радиационные эффекты: 1) поверхностный и объемный радиационно-индуцированный ток; 2) эффекты сдвига коллекторных характеристик в области насыщения и лавинного пробоя; 3) изменения тока коллектора в активном режиме из-за влияния «горячих» носителей при воздействии различных видов радиационного излучения. Для устранения ошибок и выбросов моделирования источники тока и напряжения описываются типовыми выражениями для всех учтенных эффектов, кроме учета изменения напряжения пробоя. Для этой цели в базовую SPICE-модель вводятся зависимости для параметров лавинного пробоя биполярного транзистора от поглощенной дозы или потока. Такой подход к созданию SPICE-макромодели Si БT и SiGe ГБТ позволяет иметь единое математическое описание, эквивалентную схему и набор дополнительных радиационнозависимых параметров для всех видов радиационного воздействия.

На рис. 3.43 приведена эквивалентная схема унифицированной SPICE-RADмакромодели Si БT и SiGe ГБT, учитывающей основные радиационные эффекты. Для учета радиационных эффектов к базовой модели подключены дополнительные схемные элементы, учитывающие специфику влияния радиационных излучений электрических характеристик биполярных транзисторов, а также добавлены зависимости параметров лавинного пробоя базовой SPICE-модели.

67

В разработанной автором SPICE-макромодели для учета влияния различных эффектов при воздействии различных видов радиации используются следующие дополнительные схемные элементы: 1) источник тока $I_6(D)$, описывающий радиационноиндуцированный ток базы в области малых токов после облучения (см. рис. 3.44 (a)); 2) источник тока $I_{cor}(D)$, учитывающий эффект влияния «горячих» носителей заряда на деградацию тока коллектора после облучения (см. рис. 3.44 (б)); 3) источник напряжения $V_{cor}(D)$, учитывающий сдвиг напряжения насыщения и пробивного напряжения в области насыщения и лавинного пробоя (см. рис. 3.44 (б)).



Рис. 3.43. SPICE-макромодель Si БТ/SiGe ГБТ учитывающая влияния разных

видов радиационных излучений





Рис. 3.44. Изменение входных (а) и выходных (б) характеристик биполярного транзистора при воздействии различных видов радиации

3.1.1 Учет радиационно-индуцированного тока базы

Для учета радиационно-индуцированного тока в эквивалентную схему рис. 3.43 SPICE-макромодели Si БT/SiGe ГБТ при воздействии различных видов радиационных излучений, включен источник тока $I_{6}(D)$, который представляет собой суперпозицию двух составляющих, объемной и поверхностной:

$$I_{\delta}(\mathbf{D}) = I_{s_bulk}(D) + I_{s_surf}(D)$$
(3.20)

Объемная составляющая обусловлена действием структурных дефектов в объеме базы и описывается следующим выражением:

$$I_{s_bulk}(D) = I_{sd} \left(1 + K_d \cdot D \right) \left(e^{\frac{U_{E\Im}}{n_{ed} \cdot \varphi_t}} - 1 \right), \qquad (3.21)$$

Поверхностная составляющая обусловлена действием ионизационных эффектов и описывается следующим выражением:

$$I_{s_surf}(D) = I_{ss\max}\left(1 - e^{-K_s \cdot D}\right) \left(e^{\frac{U_{E\mathcal{I}}}{n_{es} \cdot \varphi_t}} - 1\right),$$
(3.22)

где: *I*_{sd}, *I*_{ssmax}, *K*_d, *K*_s, *n*_{ed}, *n*_{es}, – числовые коэффициенты; *D* – поглощенная доза излучения или поток частиц; *U*_{бэ} – напряжение база-эмиттер, φ_t – тепловой потенциал.

На рис. 3.45 представлен пример влияния только поверхностной, только объемной составляющей и их совместное влияние на входные ВАХ и коэффициент усиления по току Si БT 2T378 при воздействии электронного излучения.

70



Рис. 3.45. Пример влияния только поверхностной (а, б), только объемной (в, г) составляющей и их аддитивное влияние (д, е) на входные вольт-амперные характеристики (BAX) (а, в, д) и коэффициент усиления по току (б, г, е) Si БТ 2Т378 при воздействии электронного излучения с поглощенными дозами 1·10⁴ и 1·10⁵ рад

При этом на выходных характеристиках биполярного транзистора учитывается только изменение тока коллектора в активном режиме, причем точность моделирования этого тока напрямую зависит от точности моделирования коэффициента усиления транзистора по току. На рис. 3.46 представлены выходные ВАХ для SiGe ГБТ 8HP при $I_6=3,5\cdot10^{-6}$ A до и после воздействия гамма-излучения с поглощенными дозами $6\cdot10^6$ рад и $30\cdot10^6$ рад для разработанной ранее SPICE-модели и разработанной автором макромодели с учётом только радиационно-индуцированного тока.

Представленные макромодели с достаточной точностью (расхождение составляет не более 15%) описывают входные ВАХ, зависимость коэффициента усиления от напряжения база-эмиттер (и/или от тока коллектора) и ток коллектора в активном режиме. Однако, в области насыщения и лавинного пробоя для макромодели, представленной в работе [34], наблюдаются существенные отрицательные токи в области насыщения, что неприемлемо для схемотехнического моделирования.

Для того чтобы описать ток коллектора в режиме насыщения и лавинного пробоя на коллекторных характеристиках Si БT и SiGe ГБT, в макро модель были добавлены зависимости для параметров лавинного пробоя базовой SPICE-модели, а также источник тока, параметры которого зависят от поглощенной дозы (см. рис. 9.43).



a)



Рис. 3.46. Выходные ВАХ для SiGe ГБТ 8НР при I₆=3,5·10⁻⁶ А до и после воздействия гамма-излучения с поглощенными дозами 6·10⁶ рад, 30·10⁶ рад для макромодели, представленной в работе [34], (а) и разработанной макромодели с учётом только радиационно-индуцированного тока (б)

3.1.2 Учет эффектов смещения тока коллектора в режиме насыщения и в области лавинного пробоя

Для учета изменения напряжения насыщения к базовой модели в цепь коллектора был подключен источник напряжения $V_{cor}(D)$, учитывающий эффект увеличения напряжения V_{hac} в результате облучения.

На рис. 3.47, для примера, приведена зависимость напряжения насыщения $V_{\text{нас}}$ от поглощенной дозы электронного излучения для n-p-n Si БT интегральной схемы операционного усилителя [35]. Из рис. 3.47 видно, что напряжения насыщения $V_{\text{нас}}$ сильно зависит от поглощенной дозы. Поэтому для каждого вида облучения разработанная SPICE-макромодель должна описывать изменения напряжения насыщения БT с достаточной точностью. Для этого необходимо описать представленную зависимость напряжения насыщения $V_{\text{нас}}$ от поглощенной дозы или интегрального потока с использованием следующего уравнения:

$$V_{cor}(D) = \left(V_0 + g \cdot \exp\left[-h \cdot D\right]\right) \left(1 - \exp\left[-\frac{U_{\kappa \vartheta}}{n_{es} \cdot \varphi_t}\right]\right), \quad (3.23)$$


Рис. 3.47. Зависимости напряжения насыщения V_{нас} от поглощенной дозы электронного излучения для интегрального биполярного n-p-n транзистора

где: n_{es} , V_0 , g, h – подгоночные коэффициенты; D – поглощённая доза излучения или поток частиц; U_{k} – напряжение коллектор-эмиттер.

В выражении (3.23) первый множитель $\{V_0 + g \cdot \exp[-h \cdot D]\}$ нужен для описания зависимости напряжения насыщения $V_{\text{нас}}$ от поглощенной дозы или интегрального потока. Однако это приведет к появлению отрицательных значений тока коллектора при малых напряжениях коллектор-эмиттер, как и в работе [34]. Поэтому в выражение (3.23) был добавлен множитель $\{(1 - \exp[-U_{\kappa_9} / n_{es} \cdot \varphi_l])\}$, который зависит от напряжения коллектор-эмиттер и позволяет исключить подобные ситуации. Для определения параметров уравнения (3.23) требуется определить приращение напряжения насыщения $\Delta V_{\text{нас}}(D) = V_{\text{нас}}(D) \cdot V_{\text{нас}}(D)$ и $V_{\text{нас}}(0)$ напряжение насыщения до и после облучения поглощенной дозой или интегральным потоком, соответственно.

На рис. 3.48 приведен пример аппроксимации приращения напряжения насыщения для биполярного n-p-n Si БT после облучения электронами с суммарной поглощенной дозой до $1,1\cdot10^7$ рад с радиационно-зависимыми параметрами V = 0,23 B, g = 0,229 B, $h = 1,95\cdot10^{-6}$ 1/рад, $n_{\rm es} = 2,5$.

Учет эффекта сдвига пробивного напряжения на выходных характеристиках биполярного транзистора при воздействии проникающей радиации, рассмотрен нами для базовой модели VBIC; для остальных базовых моделей (MEXTRAM, HiCUM) учет производится аналогичным методом.

В базовой модели VBIC лавинное умножение описывается следующим выражением:

$$I_{GC} = (I_{TXF} - I_{TZR} - I_{BCJ}) \cdot AVC1 \cdot vl \cdot \exp(-AVC2 \cdot vl^{MC-1}), \qquad (3.24)$$

где: параметры AVC1 и AVC2 отвечают за лавинное умножение (см. рис. 3.44).

Для учета эффекта сдвига напряжения лавинного пробоя в параметры базовой модели VBIC, отвечающие за лавинный пробой были добавлены следующие выражения:

$$AVC1(D) = AVC1(0) \cdot (1 + K_{AVC1} \cdot D)$$
(3.25)

$$AVC2(D) = AVC2(0) \cdot (1 + K_{AVC2} \cdot D)$$
(3.26)

где: *AVC*1(0), *AVC*2(0)– параметр базовой модели VBIC для лавинного пробоя, *K*_{AVC1}, *K*_{AVC2}– подгоночные коэффициенты; *D* – поглощённая доза излучения или поток частиц.



Рис. 3.48. Аппроксимация зависимости приращения напряжения насыщения для биполярного n-p-n транзистора после облучения электронами от суммарной поглощенной дозы с уровнями до $1,1\cdot10^7$ рад с радиационно-зависимыми параметрами $V_0 = 0,23$ B, g = 0,229 B, $h = 1,95\cdot10^{-6}$ 1/рад, $n_{\rm es} = 2,5$

На рис. 3.49 приведен пример выходных ВАХ для SiGe ГБТ 8HP при $I_6=3,5\cdot10^{-6}$ A до и после воздействия гамма-излучения с поглощенными дозами $6\cdot10^6$ рад, $30\cdot10^6$ рад для разработанной макромодели с радиационно-зависимыми параметрами $V_0 = 0,23$ B, g = 0,229 B, $h = 1,95\cdot10^{-6}$ 1/рад, $n_{es} = 2,5$, $K_{AVC1} = 3,0\cdot10^{-9}$ 1/рад, $K_{AVC2} = 5,0\cdot10^{-9}$ 1/рад.

Из рис. 3.49 видно, что при использовании разработанной автором макромодели в области насыщения и лавинного пробоя экспериментальные и смоделированные результаты хорошо согласуются и ошибка составляет не более 15%. При этом отрицательных значений токов при малых напряжениях коллектор-эмиттер не наблюдается.



Рис. 3.49. Выходные ВАХ для SiGe ГБТ 8НР при I₆=3,5·10⁻⁶ А до и после воздействия гамма-излучения с поглощенными дозами 6·10⁶ рад, 30·10⁶ рад, рассчитанных с помощью разработанной макромодели

3.1.3 Учет эффекта влияния «горячих» носителей заряда на ток коллектора

При исследованиях характеристик облученных биполярных транзисторов было замечено, что деградация тока базы и, как следствие, коэффициента усиления по току происходит из-за двух эффектов: 1) влияние радиации; 2) влияние «горячих» носителей. Так исследование 2T378 показало, что при измерении входной характеристики с разными напряжениями коллектор-эмиттер ($U_{\kappa_9} = 0$ B, $U_{\kappa_9} = 2$ B и $U_{\kappa_9} = 5$ B) при суммарных поглощенных дозах $1 \cdot 10^4$ рад и $1 \cdot 10^5$ рад наблюдается расхождение между значениями токов коллектора и базы при $U_{\kappa_9} = 0$ B, $U_{\kappa_9} = 2$ B, $U_{\kappa_9} = 5$ B. При увеличении уровня поглощенной дозы эта разница становится все больше (см. рис. 3.50).



Рис. 3.50. Характеристика Гуммеля 2Т378 с напряжениями $U_{\kappa_3} = 0$ В, $U_{\kappa_3} = 2$ В и $U_{\kappa_3} = 5$ В при суммарных поглощенных дозах 1·10⁴ рад (а) и 1·10⁵ рад (б)

При моделировании выходных характеристик БТ из-за большей деградации коэффициента усиления по току, которое обусловлено одновременным учетом влияния горячих носителей и радиационных эффектов, происходит увеличение ошибки моделирования тока коллектора на выходных характеристиках в активном режиме (см. рис. 3.51).

Поэтому для исключения эффекта влияния «горячих» носителей к базовой модели подключен источник тока между базой и коллектором (см. рис. 3.43).





б)



Рис. 3.51. Сравнение измеренных и смоделированных выходных характеристик 2Т378, полученных с параметрами, найденными из входной ВАХ при напряжении коллектор-эмиттер U_{кэ} = 0 B (a), U_{кэ} = 2 B (б), U_{кэ} = 5 B (в), до и после гаммаизлучения с суммарной поглощенной дозой 1.10⁵ рад

Данный источник тока I_{cor} (*D*), корректирующий ток коллектора в активном режиме транзистора после полученной дозы, описывается следующим выражением:

$$I_{cor}(D) = I_{\delta} \cdot (1 - K_{rad} \cdot D), \qquad (3.27)$$

где: *К*_{гаd} – числовой коэффициент; *U*_{кэ} – напряжение коллектор-эмиттер;

На рис. 3.52 приведено сравнение измеренных и смоделированных выходных характеристик 2T378 с использованием SPICE-макромодели, дополнительный набор радиационно-зависимых параметров которой был определен из входной BAX при напряжении коллектор-эмиттер U_{кэ} = 5 В после воздействия гамма-квантов с суммарной поглощенной дозой $1 \cdot 10^5$ рад с учетом влияния «горячих» носителей. Для моделирования было получено значение параметра $K_{rad} = 2 \cdot 10^{-6}$ 1/рад.

Основной особенностью разработанной макромодели биполярного транзистора является универсальный подход, позволяющий учитывать деградацию характеристик биполярных транзисторов при воздействии различных видов радиации с приемлемой точностью.



Рис. 3.52. Сравнение измеренных (точки) и смоделированных (линии) выходных характеристик БТ 2Т378 после гамма-излучения с суммарной поглощенной дозой 1.10⁵ рад для разработанных ранее SPICE-моделей

Сравнение разработанной макромодели и других известных моделей [27], [31],[28] [33]-[37], [39]-[41] показало, что разработанная макромодель обладает большей гибкостью при описании изменения тока базы, что позволяет описывать с большей точностью изменение тока базы после облучения в разных режимах работы транзистора. Также в отличие от аналогичных работ, где влияние радиации на выходные характеристики либо учитывается частично, либо не учитывается совсем, разработанная макромодель учитывает эффекты усиления радиационной деградации параметров от влияния «горячих» носителей и эффекты сдвига выходных коллекторных характеристик в области насыщения и лавинного пробоя.

Другой важной составляющей SPICE-модели Si БT/ SiGe ГБТ является определение набора дополнительных параметров SPICE-макромодели, учитывающих радиацию. Поэтому была разработана методика, позволяющая определять коэффициенты модели (3.21) – (3.23), (3.25) – (3.27) из набора входных и выходных ВАХ и частотных характеристик облученного биполярного транзистора. В аналогичных работах для экстракции параметров SPICE-модели требуются дополнительные, сложные и зачастую трудоемкие измерения, что в конечном итоге приводит к увеличению затрат времени на подготовку модели Si БT/SiGe ГБТ к схемотехническому моделированию ИС и БИС.

Примеры использования разработанной автором универсальной SPICE-RADмакромодели рассматриваются в Главе 4 настоящей диссертации.

78

3.2 Экстракция дополнительного набора радиационно-зависимых параметров унифицированной SPICE-макромодели Si/SiGe биполярных транзисторов

3.2.1 Экспериментальные исследования электрических характеристик биполярных транзисторов до и после воздействия радиации

Измерение характеристик и определение параметров компонентов является обязательным этапом, сопровождающим процесс проектирования и разработки БИС, микросхем и радиоэлектронной аппаратуры. Методы измерения характеристик [80] и определения параметров SPICE-моделей [81] биполярных транзисторов, работающих в нормальных условиях эксплуатации, в достаточной степени разработаны и унифицированы.

К сожалению этого нельзя сказать о приборах, которые работают в аппаратуре, подверженной воздействию радиации. Поэтому в данном разделе представлена методика проведения радиационных исследования для всех типов Si БT используемых в диссертационной работе. Стоит также отметить, что экспериментальные результаты были получены автором лично или при непосредственном участии.

Для радиационных исследований в данной работе биполярные транзисторы, которые применяются в различной специальной аппаратуре, подвергались воздействию различных видов радиационного излучения: гамма-квантов, нейтронов, электронов.

Для определения радиационной стойкости микросхем, БИС и т.п., работающих в условиях воздействия радиации, проводились специальные испытания в наземных условиях, в процессе которых после каждого вида радиационного воздействия измеряется необходимый набор электрических характеристик и параметров прибора.

Для каждого вида радиации устанавливается набор значений дозы или интегрального потока излучения, для которых необходимо определить реакцию прибора.

Очевидно, что по сравнению с нормальными условиями, процесс измерений существенно усложняется. Во-первых, добавляется испытательное и измерительное оборудование, реализующее процедуру радиационного облучения; причем, методики проведения эксперимента и измерений сложны, специфичны, а в ряде случаев уникальны. Во-вторых, резко увеличивается объем измерений электрических характеристик, так как измерения необходимо проводить многократно – для каждой дозы, энергии или интенсивности конкретного вида воздействия. Причем видов воздействия радиации может быть несколько, так как в процессе эксплуатации в космических условиях они, как правило, действуют одновременно. В-третьих, существенно усложняются как SPICEмодели, описывающие приборы с учетом радиационных эффектов, так и процедуры экстракции их параметров из результатов измерений. В-четвертых, усложняются процедуры обработки результатов измерений. В-пятых, усложняется процесс принятия решения о функциональной пригодности прибора в реальных условиях эксплуатации, так как вводится дополнительный критерий оценки – степень деградации параметров прибора в условиях действия радиационных факторов.

В настоящее время при проведении измерений электрических характеристик биполярных транзисторов, применяемых в аппаратуре, подверженной воздействию различных радиационных факторов, не существует единых, типовых, в достаточной степени отработанных методик. Такая же ситуация наблюдается в вопросе экстракции SPICEпараметров схемотехнических моделей транзисторов для цепей САПР.

В существующих публикациях для каждого типа приборов и условий их практического применения в аппаратуре задачи измерения характеристик и определения параметров SPICE-моделей решаются самостоятельно [82]-[87]. Используемые при этом измерительные средства и методики измерений детально не раскрываются, а в ряде случаев являются тщательно охраняемыми фирменными секретами. Приводимые в различных работах результаты аналогичных экспериментов существенно различаются.

Поэтому в данной главе представлена методика радиационных исследований с определенной степенью формализованной и унифицированной процедурой измерений электрических характеристик биполярных транзисторов, подверженных воздействию различных видов радиации. Выделено общее для всех типов транзисторов и видов радиации единое измерительное ядро, в структуру которого входят комплекс измерительных приборов, набор тестовых транзисторов, методик измерений их характеристик и обработки результатов измерений. Разработана автоматизированная подсистема измерения характеристик и параметров биполярных транзисторов, подвергнутых воздействию различных видов радиации. В процессе работы подсистемы осуществляется автоматическое многократное обращение к единому ядру, в результате чего упрощается процедура и резко сокращается время измерений, а также исключается возникновение ошибок, вызванных человеческим фактором. Работа подсистемы проиллюстрирована на примерах измерений электрических характеристик биполярных транзисторов, подвергнутых воздействию нейтронов, электронов и гамма-квантов. <u>Описание эксперимента.</u> Для проведения экспериментальных исследований влияния гамма-, электронного и нейтронного излучений на БТ используется общий подход, блок-схема которого представлена на рис. 3.53.



Рис. 3.53. Блок-схема автоматизированных измерений электрических характеристик БТ до, в процессе и после радиационного воздействия

Измерения характеристик БТ обычно проводятся на партии из нескольких транзисторов, которые подвергаются радиационному воздействию, при этом транзисторы могут быть расположены на полупроводниковых пластинах или собраны в корпуса. Измерение характеристик транзисторов проходит непосредственно перед облучением, в процессе и в течение одного часа после облучения. При этом для измерения характеристик предпочтительно используется четырёхпроводный метод, при котором подача и измерение напряжения производятся по отдельным парам проводов [88]. Для измерений характеристик БТ, определения радиационной стойкости и экстракции параметров SPICE-моделей биполярных транзисторов с целью последующего приборно-технологического и схемотехнического моделирования использовалось нейтронное, электронное и гамма-излучение.

<u>а. Облучение нейтронами.</u> Облучение БТ нейтронами проводилось на импульсном ядерном реакторе БАРС-4 с энергией 1,25 МэВ в Научно-исследовательском институте приборов (ФГУП «НИИП»). Импульсный ядерный реактор имеет металлическую активную зону, которая используется как интенсивный источник гамма- и нейтронного излучения для исследований радиационной стойкости радиоэлектронной аппаратуры. Средняя мощность реактора 1 кВт, пиковая мощность в импульсе $1,4\cdot10^8$ кВт. Облучение биполярных транзисторов проводилось для дискретного набора потоков нейтронов Φ_{ni} в диапазоне от 10^{11} до 10^{15} см⁻². Погрешность измерения потока нейтронов составляет не более 15%. В связи с тем, что после облучения остается наведенная активность на образцах и в помещении, где установлен реактор, после очередного цикла облучения у исследователя нет возможности провести измерения непосредственно на месте. Следовательно, приходится проводить измерения дистанционными методами (с расстоянием от средств измерений до образцов около 20 метров) или располагать измерительную аппаратуру рядом с образцами (что требует дистанционного управления).

С учётом известного значения потока нейтронов заранее определяются моменты времени, соответствующие заданному набору контрольных уровней излучения { Φ_{ni} }. После каждого i-го облучения приборов нейтронами с конкретным значением потока Φ_{ni} приборы поступают в так называемое «измерительное ядро», в котором для них производится измерение необходимого набора электрических характеристик. Для биполярных транзисторов измеряются прямые и обратные входные и выходные характеристики, сопротивления эмиттера и коллектора методом flyback, ёмкостные характеристики, для CBЧ транзисторов кроме того измеряются максимальная и граничная частоты, а также S-параметры. На последующем (*i*+1)-м шаге облучения с характеристическим параметром потока $\Phi_{n,i+1}$ приборы опять поступают на электрические измерения в «измерительное ядро». Процедура повторяется k- раз (k – количество дискретных значений потока Φ_{ni} , для которых производилось облучение).

<u>б. Облучение электронами.</u> Облучение БТ электронами проводилось на линейном ускорителе электронов ЛЭУТ-10-10ТМ, расположенном в Институте физической химии

и электрохимии им. А.Н. Фрумкина («ИФХиЭ») РАН. Средняя энергия пучка электронов ускорителя ЛЭУТ-10-10ТМ равна 7,5 МэВ, средний ток 1,2 мА. Дозиметрия проводилась с использованием цилиндра Фарадея, установленного на задней стенке крепления. Облучение приборов электронами проводилось для дискретного набора доз D_{ei} в диапазоне от 10⁴ до 10⁷ рад. Погрешность дозиметрии не превышает 20%.

Измерения характеристик приборов после облучения электронами производятся по аналогии с нейтронами. Процедура повторяется m- раз для дискретных значений суммарных доз D_{ei} .

<u>в. Облучение гамма-квантами.</u> БТ облучались гамма-квантами на установке ГОИС-5 (гамма облучатель интегральных схем) в АО «НПП Пульсар». Облучение образцов проводилось с мощностью дозы 42 рад/с (H₂O) и энергией гамма-квантов 0,661 МэВ. Активным элементом в установке ГОИС-5 является изотоп Cs. Погрешность дозиметрии на установке ГОИС-5 менее 10%. Облучение приборов гамма-квантами проводилось для дискретного набора доз $D_{\gamma i}$ в диапазоне от 10³ до 10⁷ рад.

Измерения характеристик приборов после облучения гамма-квантами производятся p- paз для дискретных значений суммарной дозы $D_{\gamma i}$.

Для случаев облучения гамма-квантами и электронами с энергией 7,5 МэВ на образцах отсутствует наведенная активность. Поэтому измерения характеристик образцов можно проводить на коротких кабелях. Однако если требуется проведение испытаний в активном режиме необходимо также учитывать влияние сопротивлений проводников на характеристики БТ [88].

г. Проведение эксперимента. Очевидно, что по сравнению с нормальными условиями, когда проводится только один цикл измерений характеристик, для каждого биполярного транзистора, подвергнутого воздействию трёх видов радиационного облучения, требуется проведение (k+m+p) циклов измерений.

Процедура измерения электрических характеристик реализуется с помощью разработанной автоматизированной подсистемы измерений, позволяющей снизить трудоёмкость и длительность измерений. Она состоит из набора контрольно-измерительных приборов (КИП), работающих под управлением ПО компьютера (управляющей среды LabView и отдельных макросов). Начальными данными для работы системы, задаваемыми оператором, являются тип тестовой структуры, максимально допустимые значения тока, напряжения, мощности, а также набор дискретных значений радиационного фактора, по достижении которых необходимо провести комплекс измерений. Набор КИП, подключаемых к ЭВМ по стандартным интерфейсам (GPIB, USB, RS-232), содержит: источник-измеритель Keithley 2602 для измерения статических вольт-амперных характеристик малой и средней мощности; осциллограф Tektronix DPO 7254; генератор ГСС-120; а также отдельные источники и мультиметры для измерения импульсных характеристик средней и большой мощности; измеритель иммитанса Е7-12 для измерения ёмкостных характеристик.

3.2.2 Процедура экстракции параметров биполярных транзисторов, унифицированной SPICE-макромодели Si БT/ SiGe ГБТ для стационарного излучения

Единая методика определения (экстракции) параметров [75], [76], [78] с учётом дозовых эффектов при воздействии различных радиационных излучений создана и отработана для разработанной макромодели, предложенной в диссертации. Она является модификацией стандартной методики и основана на результатах измерения, на тестовых кристаллах электрических характеристик реальных облучённых и необлучённых приборов, или результатах приборного моделирования приборов, чей маршрут проектирования и конструкция ещё только разрабатываются.

Важно отметить, что для разработанной методики экстракции требуется лишь набор стандартных характеристик Si БT и SiGe ГБT, снимаемых по стандартным методикам.

Для автоматизированного получения стандартного набора электрических характеристик Si БT и SiGe ГБТ был собран специализированный аппаратно-программный комплекс, описанный ранее. Для передачи в систему экстракции параметров результатов машинного эксперимента автором были разработаны макросы, функционирующие в системе приборно-технологического моделирования Sentaurus Synopsys.

Исходными данными являются стандартные наборы ВАХ: входные, выходные и частотные характеристики Si БT и SiGe ГБT при разных дозах полученного облучения. Результаты реального или машинного эксперимента обрабатываются в комплексе математических расчетов MathCAD.

Процедура экстракции позволяет получить параметры модели для промежуточных доз облучения различных видов и включает в себя следующие шаги:

84

1) определяется набор параметров базовой модели для случая необлучённого биполярного транзистора – с использованием любых доступных методов и стандартных процедур, в том числе, с использованием автоматизированного комплекса IC-CAP [91] и стандартного набора измеренных характеристик;

2) из полного набора параметров, описывающих элементы эквивалентной схемы макромодели биполярного транзистора, выбирается перечень основных радиационнозависимых параметров при воздействии различных видов радиационного излучения;

3) для каждого уровня полученной дозы D_i или интегрального потока Φ_i определяются соответствующие значения: тока базы (ионизационные повреждения) $I_{s_surf}(D)$, получаемые экстраполяцией до напряжения база-эмиттер $U_{\delta_3}=0$ В; тока базы (структурные повреждения) $I_{s_bulk}(D)$, при напряжении база-эмиттер $U_{\delta_3}=0,6\div0,8$ В, напряжения насыщения $V_{\text{нас}}(D)$; напряжения лавинного пробоя $V_{\text{проб}}(D)$; влияния «горячих» носителей на радиационную деградацию $I_{\text{сог}}(D)$. Данная процедура повторяется для всех запланированных уровней облучения;

4) табличные функции зависимости $I_{s_surf}(D)$, $I_{s_bulk}(D)$, $V_{Hac}(D)$, $V_{npob}(D)$, $I_{cor}(D)$ аппроксимируются аналитическими функциями вида $a_1 [1 - b_1 \cdot exp(-a_2D)]$, $a_3 [1 + b_2D)] - c$ помощью программы оптимизации; коэффициенты таких функций как раз и составляют набор радиационных параметров всей макромодели;

5) полученные коэффициенты из аналитических функций включаются в описание SPICE-RAD-макромодели биполярного транзистора;

6) макромодель биполярного транзистора, содержащая радиационно-зависимые параметры, включается в состав библиотеки моделей.

Данная процедура даёт возможность получить параметры модели для промежуточных доз облучения.

При схемотехническом моделировании в программах Eldo, Spectre, UltraSim и др. величина поглощённой дозы D или интегрального потока Φ задаётся для всей схемы в целом.

3.2.2.1 <u>Процедура экстракции параметров разработанной макромодели для</u> необлученных биполярных транзисторов

Стандартная процедура экстракции параметров модели без учёта радиационных эффектов проводится с использованием любых доступных методов и стандартных про-

цедур, в том числе, с использованием автоматизированного комплекса IC-CAP. Исходными данными являются наборы входные, выходные и частотные характеристики Si БT и SiGe ГБТ структур, передаваемые в IC–CAP.

Если при проектировании биполярных схем используются транзисторы с различными размерами, то для корректного их описания во всём диапазоне размеров необходимо использовать набор транзисторных структур различных размеров.

Необходимый набор экспериментальных статических характеристик каждой тестовой транзисторной структуры для экстракции полного набора параметров модели приведён в таблице 3.5; указано стандартное название семейства характеристик, входящий в него набор зависимостей, а также требуемая для измерений тестовая структура.

При нахождении параметров модели используется локальная стратегия оптимизации (разбиение параметров на группы и оптимизация каждой группы в отдельности) и сочетание глобальной и локальной стратегии экстракции (разбиение набора транзисторов различных размеров на группы и усреднение их характеристик).

Таблица 3.5. Набор экспериментальных характеристик, необходимый для экстракции полного набора параметров модели биполярного транзистора

Название семейства	Состав семейства
характеристик	
f_input, r_input	I_{5}, I_{κ} от V_{5} при нескольких V_{κ}
(прямая и обратная	$I_{\mathfrak{5}}, I_{\mathfrak{3}}$ от $V_{\mathfrak{5}\mathfrak{3}}$ при нескольких $V_{\mathfrak{3}\mathfrak{K}}$
входная характеристика)	
icvce	I_{κ} от V_{κ} , при нескольких I_{δ}
(выходная)	
f_early, r_early	I_{κ} от V_{κ} при нескольких V_{δ}
(прямая и обратная	$I_{\mathfrak{I}}$ от $V_{\mathfrak{I}\mathfrak{K}}$ при нескольких $V_{\mathfrak{G}\mathfrak{I}}$
выходная характеристика)	
re_flyback	I_{5} , от $V_{\kappa_{2}}$ при нескольких V_{5}
(сопротивление эмиттера)	
rc_flyback	I_{5} от V_{5} при нескольких $V_{3\kappa}$
(сопротивление коллектора)	

3.2.2.2 <u>Процедура экстракции параметров разработанной макромодели для</u> учета поверхностной составляющей радиационно-индуцированного тока

Для определения параметров I_{ssmax} , n_{es} и K_s нужно измерить ток базы до и после воздействия радиации. Далее для каждой полученной дозы и интегрального потока определяются абстрактное значение значения тока базы $I_{6_{(0)}}$, которое определяется экс-

86

траполяцией тока базы при напряжении $U_{6_3}=0,2\div0,5$ В до значений напряжения $U_{6_3}=0$ В, и коэффициент неидеальности n_{es} . Значения параметров I_{ssmax} и n_{es} выбираются для максимального уровня поглощенной дозы или интегрального потока. Для того, чтобы определить параметр K_s необходимо построить зависимость $I_{6_{-}(0)}$ от дозы. На рис. 3.54 приведен пример экстракции параметра K_s для n-p-n Si БT интегральной схемы (см. пункт 4.3.2). После чего зависимость $I_{6_{-}(0)}$ от дозы аппроксимируется функцией вида $a_1 [1 - b_1 \cdot exp(-a_2D)] \cdot exp(U_{6_3}/n_{es} \cdot \phi_t)$, где $a_1 = I_{ssmax} = 1,755 \cdot 10^{-10}$ A, $b_1 = 1$, $n_{es} = 2,519$, $a_2 = K_s = 3,1 \cdot 10^{-7}$ 1/pag.



Рис. 3.54. Экстракция радиационно-зависимого параметра K_s по значениям I_{6 (0)} Si n-p-n биполярного транзистора

После проделанной процедуры все параметры для учета поверхностной составляющей радиационно-индуцированного тока определены. Стоит отметить, что данная методика определения радиационно-зависимых параметров используется только при моделировании электронного, протонного и гамма-излучений. Для нейтронного излучения поверхностной составляющей можно пренебречь и, следовательно, при моделировании её не требуется учитывать.

3.2.2.3 <u>Процедура экстракции параметров макромодели для учета объемной</u> <u>составляющей радиационно-индуцированного тока</u>

Требуется определить три параметра I_{sd} , K_d и n_{ed} , отвечающие за объемную составляющую радиационно-индуцированного тока. Для определения параметров I_{sd} , K_d и n_{ed} нужно измерить ток базы до и после воздействия радиации. Первыми определяются параметры I_{sd} и n_{ed} . Для этого необходимо решить систему выражений при D=0 и двух напряжений база-эмиттер в пределах U_{69} = 0,6÷0,8 В:

$$I_{s_bulk_1}(D=0) = I_{sd} \left(e^{\frac{U_{E\ni_1}}{n_{ed} \cdot \varphi_t}} - 1 \right);$$
(3.28)

$$I_{s_{bulk_{2}}}(D=0) = I_{sd}\left(e^{\frac{U_{D_{2}}}{n_{ed}}\cdot\varphi_{t}} - 1\right),$$
(3.29)

Для n-p-n Si БT интегральной схемы (см. пункт 4.3.2) получаем значение параметров $I_{sd} = 2 \cdot 10^{-19}$ A и $n_{ed} = 1,2$. Далее определяется параметр K_d . Для этого нужно решить уравнение при напряжении база-эмиттер в пределах $U_{69} = 0,6 \div 0,8$ В и поглощенной дозе D_1 или интегральном потоке Φ_1 с использованием ранее найденных параметров I_{sd} и n_{ed} :

$$I_{s_bulk_1}(D = D_1) = I_{sd} \left(1 + K_d \cdot D_1 \right) \left(e^{\frac{U_{D3}}{n_{ed} \cdot \varphi_t}} - 1 \right),$$
(3.30)

Значение поглощенной дозы *D*₁ или интегрального потока Ф₁ выбирается для значений с уровнем минимальной поглощенной дозой.

Для этого Si БT получаем значения радиационного-зависимого параметра $K_{\rm d} = 2,5\cdot 10^{-4}$ 1/рад.

Следует отметить, что параметры I_{sd} , K_d и n_{ed} определяются при моделировании всех типов излучения; исключение может быть сделано для гамма-излучения с поглощённой дозой до $1 \cdot 10^5$ рад.

3.2.2.4 <u>Процедура экстракции параметров макромодели для учета эффектов</u> <u>смещения тока коллектора в области насыщения и лавинного пробоя</u>

Необходимо определить параметры для учета эффектов смещения тока коллектора в режиме насыщения (параметры V_0 , g, h) и в области лавинного пробоя (параметры K_{avc1} , K_{avc2} для базовой модели VBIC).

<u>Для определения радиационно-зависимых параметров V_{0} , *g*, *h* макромодели на первом этапе нужно померить напряжение насыщения $V_{\text{нас}}$ для различных уровней поглощенной дозы или интегрального потока по стандартным методикам [80] или определить из коллекторных характеристик. После чего определить приращение напряжения</u> насыщения $\Delta V_{\text{нас}}(D) = V_{\text{нас}}(D) - V_{\text{нас}}(0)$, где $V_{\text{нас}}(D)$ и $V_{\text{нас}}(0)$ напряжение насыщения до и после облучения поглощенной дозой или интегральным потоком, соответственно, и построить зависимость приращения напряжения насыщения $\Delta V_{\text{нас}}$ от поглощенной дозы/интегрального потока. На последнем шаге необходимо аппроксимировать получившуюся зависимость выражением типа $a_1 - b_1 \cdot \exp[-a_2 \cdot D]$, для n-p-n Si БT интегральной схемы (см. пункт 4.3.2) были получены следующие параметры: $a_1 = V_0 = 0,0856$ B, $b_1 = g = 0,0856$ B, $a_2 = h = 4 \cdot 10^{-6}$ 1/рад (см. рис. 3.55).



Рис. 3.55. Экстракция параметров V_{θ}, g, h

<u>Определение радиационно-зависимых параметров K_{avc1} и K_{avc2}, которые учитывают сдвиг пробивного напряжения на выходных характеристиках биполярного транзистора при воздействии проникающей радиации рассмотрим для базовой модели VBIC; для остальных базовых моделей (MEXTRAM, HiCUM) учет производится аналогичным методом. В базовой модели VBIC лавинное умножение описывается следующим выражением:</u>

$$I_{GC} = (I_{TXF} - I_{TZR} - I_{BCJ}) \cdot AVC1 \cdot vl \cdot \exp(-AVC2 \cdot vl^{MC-1}), \qquad (3.31)$$

где: параметры AVC1 и AVC2 отвечают за лавинное умножение (см. рис. 3.44).

Далее для определения параметров K_{AVC1} и K_{AVC2} необходимо на выходных характеристиках определить значения напряжения лавинного пробоя AVC1 и изменение крутизны наклона AVC2 при всех уровнях дозы. На следующем шаге необходимо построить зависимость этих параметров от поглощенной дозы и аппроксимировать линейной функцией a₁[1+b₁·D] (см. рис 3.56). Для SiGe ГБТ 8HP при I₆=3,5·10⁻⁶ A были получены следующие параметры: 1) для AVC1: $a_1 = AVC1 = 1,26$, $b_1 = K_{AVC1} = 3,0.10^{-9}$ 1/рад; 2) для AVC2: $a_1 = AVC2 = 36$, $b_1 = K_{AVC2} = 5,0.10^{-9}$ 1/рад.

Знаки коэффициентов K_{AVC1} и K_{AVC2} определяют увеличение (+) или уменьшение (-) начального напряжения лавинного пробоя и крутизны возрастания тока при лавинном умножении.



Рис. 3.56. Экстракция параметров КАVC1 и КАVC2

3.2.2.5 <u>Процедура экстракции параметров макромодели для учета эффекта</u> влияния «горячих» носителей заряда на ток коллектора

Для учета эффекта влияния «горячих» носителей заряда на ток коллектора биполярных транзисторов необходимо определить радиационно-зависимый параметр K_{rad} . Для этого сначала нужно определить степень влияния горячих носителей, для этого необходимо померить характеристики Гуммеля с разным напряжением коллекторэмиттер. В случае нахождения влияния «горячих» носителей заряда на ток коллектора необходимо определить разницу между экспериментальными и смоделированных значениями тока коллектора при постоянном токе базы в активном режиме после облучения различными уровнями поглощенной дозы/интегрального потока $\Delta I(D) = I_{изм}(D_1) - I_{модел}(D_1)$. После чего необходимо построить зависимость ΔI от дозы/интегрального потока и аппроксимировать функцией типа: $a_1 [1 - b_1 \cdot D]$ (см. рис.

3.57). Для Si БT 2T378, были получены следующие параметры: $a_1 = I_6 = 5 \cdot 10^{-5}$ A, $b_1 = K_{rad} = 6.5 \cdot 10^{-5}$ 1/рад.



Рис. 3.57. Экстракция параметра *K*_{rad} для учета эффекта влияния «горячих» носителей на ток коллектора

После проделанной процедуры экстракции известен полный набор дополнительных радиационно-зависимых параметров SPICE-RAD-макромодели. Данная процедура реализована в программе математических расчетов MathCAD, что позволяет сократить время экстракции параметров.

3.3 Выводы по главе 3

Результатами исследований, приведенных в главе 3, являются:

1) разработана и развита унифицированная SPICE-макромодель Si БT и SiGe ГБT, которая имеет единую эквивалентную схему и систему уравнений для разных видов радиационного воздействия (электронного, протонного, нейтронного и гаммаизлучений). По сравнению с существующим набором разнородных версий SPICE-RADмоделей, значительно сокращается количество параметров, описывающих радиационнозависимые элементы модели, упрощается методика их определения;

2) по сравнению с ранее известными SPICE-моделями, в предложенной макромодели дополнительно учтены эффект усиления радиационной деградации параметров от влияния «горячих» носителей и эффект сдвига выходных коллекторных характеристик в области насыщения и лавинного пробоя, что существенно повышает точность моделирования аналоговых и аналого-цифровых схем;

3) унифицированная SPICE-модель может быть использована в промышленных схемотехнических САПР Eldo (Mentor Graphics), Spectre, UltraSim (Cadence), HSpice (Synopsys) для проектирования радиационно-стойких ИС, позволяя рассчитывать электрические характеристики Si БТ и SiGe ГБТ БИС при воздействии различных видов радиации в широком диапазоне действующего фактора. По сравнению с используемым в существующих симуляторах набором отдельных SPICE-моделей для каждого вида воздействия, унифицированная модель, общая для всех видов воздействий, описывается значительно меньшим количеством параметров, имеет более простую методику их определения, что позволяет сократить трудоемкость и время подготовки и обработки данных до и после расчета;

4) для пользователей разработаны полуавтоматические процедуры определения параметров биполярных транзисторов с учётом воздействия стационарного радиационного излучения на основе результатов измерений тестовых образцов или результатов приборного-технологического моделирования в системе TCAD;

5) погрешность моделирования электрических характеристик Si БT и SiGe ГБТ БИС, подвергнутых воздействию электронов, нейтронов, протонов и гамма-квантов составляет: 10–15% для статических ВАХ и 15–20% для динамических характеристик в широком диапазоне доз и потоков радиации.

Глава 4 Применение разработанных TCAD и SPICE моделей в практике проектирования Si БT и SiGe ГБТ и фрагментов ИС и БИС, подвергнутых воздействию радиации

В данной главе приведены примеры сквозного TCAD-SPICE моделирования Si БТ и SiGe ГБТ и результаты использования разработанных автором моделей для приборнотехнологического и схемотехнического моделирования Si БТ и SiGe ГБТ и фрагментов радиационно-стойких БИС на их основе, полученные при выполнении ряда НИОКР с предприятиями Росэлектроники и Роскосмоса, а также проектов по ФЦП и грантам РФФИ и НИУ ВШЭ.

4.1 Примеры сквозного TCAD-SPICE моделирования Si БT и SiGe ГБТ при воздействии нейтронного излучения

В настоящее время все большее распространение получает сквозное TCAD-SPICE моделирование с учетом влияния радиационных эффектов. Поэтому в диссертационной работе рассмотрена возможность сквозного TCAD-SPICE моделирования Si БТ и SiGe ГБТ с использованием разработанных моделей радиационных эффектов. В данной главе представлены результаты сквозного TCAD-SPICE моделирования на примерах Si БТ 2T378 и SiGe ГБТ, изготовленного по технологии 8WL, с учетом влияния нейтронного излучения. При этом TCAD моделирования используется для определения параметров базовой SPICE-модели и дополнительного набора параметров SPICE-RAD-модели, учитывающих воздействие нейтронов, для получения характеристик биполярной структуры после облучения.

4.1.1 Пример сквозного TCAD-SPICE моделирования Si БТ 2Т378 при воздействии нейтронного излучения

Сквозное TCAD-SPICE моделирования представлено на примере эпитаксиальнопланарных n-p-n Si БТ 2Т378, которые исследовались совместно со специалистами ОАО "НПП "Пульсар" и предназначен для телеметрических систем. В этой работе автором проводились исследования влияния нейтронного излучения на характеристики транзистора 2Т378 и его параметры, измерения электрических характеристик, а также непосредственное участие в радиационных испытаниях и сравнение математических моделей, которые включают в себя два разных типа выражений для K_{τ} .

На начальном этапе были проведены измерения входных и выходных характеристик до и после испытания на физической установке при воздействии нейтронного излучения с интегральным потоком $\Phi_n = 4 \cdot 10^{-13} \text{ см}^{-2}$. После проведения испытаний, на первом этапе сквозного моделирования воссоздана модель БТ 2Т378 в среде Synopsys Sentaurus с использованием технологической карты и топологии (см. рис. 4.58).



Рис. 4.58. Топология биполярного транзистора 2Т378

В связи с большими размерами структуры транзистора 2Т378 (площадь эмиттера – 32000 мкм²) при моделировании прибора возникла проблема, связанная с большими затратами времени на проведение виртуального эксперимента. Поэтому было принято решение, что для более быстрого расчета нужно упростить структуру БТ и моделировать только часть прибора. Однако при условии, что сохранится высокая точность моделирования и будут учтены важные эффекты в структуре транзистора. Компромисс между временем и точностью расчетов был найден путем оптимизации топологии прибора.

Так как данный биполярный транзистор имеет гребенчатую структуру, то его легко поделить на отдельные части. Оптимизация топологии БТ заключалась в уменьшении размеров, как общей площади эмиттера, так и площади базы. Общая площадь эмиттера уменьшалась за счет изменения количества ячеек, что соответственно приводило к уменьшению площади базы. При этом выдерживалось расстояние между шаблоном EMITTER и шаблоном BAZA1, характерное для топологии исходного транзистора.

Для выявления наиболее оптимальной структуры БТ были проведены расчеты нескольких топологий с разным количеством ячеек (одной, двух, трех и десяти). В качестве примера, топология для случая трех ячеек изображена на рис. 4.59. Проверка разных топологий показала, что уменьшение площади базы до 3-х ячеек не приводит к качественным изменениям токов базы и коллектора БТ, но приводит к количественным изменениям (см. рис. 4.60). Это связано с изменением общей площади эмиттера, что хорошо видно на графиках, приведенных на рис. 4.60.



Рис. 4.59. Топология части биполярного транзистора 2Т378

Причем процесс моделирования в случае десяти ячеек занимает около 3,5 часов, а в случае трех ячеек около 30 минут. Поэтому принято решение на стадии подбора параметров структуры прибора использовать топологию, состоящую из трех ячеек. Это позволяет сократить время создания и расчета структуры почти без изменения точности расчета токов базы и коллектора.

График зависимости плотности тока базы I_6 от напряжения база-эмиттер U_{63} для 3-х ячеечной структуры изображен на рис. 4.61. Точками на рисунке показана зависимость $I_6(U_{63})$ для исходной площади базы, а сплошной линией показана зависимость $I_6(U_{63})$ для оптимизированной топологии. Для сравнения экспериментальных и смоделированных ВАХ нужно токи базы и коллектора БТ перевести в плотности токов. Для чего экспериментальные значения токов были поделены на площадь эмиттера, которая равна 32000 мкм².



Рис. 4.60. Характеристики 2Т378 с разной топологией:

а) токи коллектора; б) токи базы



Рис. 4.61. График зависимости $I_{\delta}(U_{\delta_{3}})$ для 2Т378





Рис. 4.62. Структура БТ по сечению А-А

Распределение легирующей примеси по глубине по сечению в плоскости x = 75 мкм представлено на рис. 4.63.



Рис. 4.63. 1D распределение легирующей примеси по глубине

В дальнейшем на рисунках точками указаны экспериментальные данные, а сплошными линиями результаты моделирования в среде TCAD.

На рис. 4.64 – 4.65 представлены сравнения характеристик транзистора 2Т378 до облучения. Как видно из представленных графиков, измеренные и смоделированные данные достаточно хорошо согласуются.



Рис. 4.64. Входных характеристик до облучения нейтронами транзистора 2Т378



Рис. 4.65. Коэффициента усиления по току

πо	облучения	нейтронями	тпянзистопя	2T378
дu	оолу чения	пситропами	трапънстора	213/0

	Экспериментальные дан- ные	Значения, получившиеся при моделировании в САПР
U ₃₆ , B	5,8	6
U _{кб} , В	80	85

Пробивные напряжения:



Рис. 4.66. Граничная частота и максимальная частота усиления 2Т378

	Данные, взятые из ТУ на прибор	Значения, получившиеся при моделировании в САПР
f _{max} , ГГц	5,0	4,8
<i>f</i> _T , ГГц	2,0	1,7

Важным параметром БТ является время пролета носителей заряда через активную базу t_A . Величина t_A определяют по известной методике, основанной на измерении зависимости дифференциального коэффициента передачи тока базы БТ на высокой частоте от тока коллектора.

$$t_A = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_T \cdot |h_{21e}|}, \qquad (4.32)$$

где: f_T – граничная частота, h_{2le} – статический коэффициент усиления.

При условии, что расчет $f_{\rm T}$ проводился при $h_{21e} = 1$, то выражение имеет простой вид.

$$t_A = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_T}, \qquad (4.33)$$

По построенной зависимости f_T от обратной величины тока коллектора определяем время пролета через активную базу носителей заряда. Для этого нужно получившую-



ся зависимость продлить до нуля по оси абсцисс. На рис. 4.67 изображена данная зависимость.

Рис. 4.67. Зависимость $1/(2\pi f_{\rm T})$ от обратной величины тока коллектора

Получившаяся, зависимость является прямой линией, а ее пересечение с осью ординат при нулевом значении обратной величины тока коллектора, соответствует значению времени пролета через активную базу носителей заряда. Получаем значение времени пролета $2 \cdot 10^{-10}$ с, что совпадает с экспериментальными данными. После того как приборно-технологическая модель БТ была сделана и верифицирована, путем сравнения с экспериментальными данными, проводилось моделирование характеристик БТ в TCAD с учетом нейтронного излучения.

Следующий этап сквозного моделирования, заключается в исследованиях транзисторной структуры 2Т378 при воздействии нейтронного излучения. Для этого была проведена калибровка модели учета радиационных эффектов. На рис. 4.68 представлены сравнения экспериментального и смоделированного коэффициента усиления по току, с использованием уточненных выражений (2.15) и (2.16), до и после облучения нейтронами с потоком $\Phi = 4 \cdot 10^{13}$ см⁻².



Рис. 4.68. Зависимость коэффициента усиления по току β от напряжения базаэмиттер до и после облучения потоком $\Phi = 4 \cdot 10^{13}$ см⁻²

Как видно из рис. 4.68, расхождение экспериментальных и смоделированных результатов не превышает 15%.

После чего в рамках работ с ОАО «НПП «Пульсар» было проведено моделирование транзистора 2Т378 для двух типов выражений для K_{τ} : для модели Грегори и улучшенной модели. На рис. 4.69 показано сравнение экспериментальных и смоделированных результатов с использованием уточненных выражений (2.15) и (2.16) и модели Грегори (2.13) – (2.14).



Рис. 4.69. Сравнение экспериментальных [точки] и смоделированных результатов с использованием уточненных выражений (2.15) и (2.16) [сплошная линия] и модели Грегори (2.13) – (2.14) [пунктирная линия]

Из рис. 4.69 видно, что использование уточненных выражений (2.15) и (2.16) при расчете дает лучшее совпадение с экспериментальными данными в области рабочих токов БТ, чем использование при расчете выражений (2.13) – (2.14). Для SiGe ГБТ учет степени легирования еще более важный фактор, так как концентрация в базовой области достигает значений $5 \cdot 10^{18}$ см⁻³, однако, стоит учитывать, что в настоящее время, нет исследований K_{τ} для приборов с уровнем легирования более $1 \cdot 10^{17}$ см⁻³. Поэтому для уточнения выражения требуется проведение дополнительных исследований. Таким образом, можно говорить, что для прогнозирования деградации параметров нужно использовать модель с уточненными выражениями (2.15) и (2.16). Это дает более точную оценку изменения характеристик кремниевого и кремний-германиевого биполярного транзистора при воздействии нейтронного облучения.

После того, как модель для использования в TCAD была откалибрована, нами было проведено моделирование характеристик транзистора для набора значений интегрального потока нейтронов. На рис. 4.70 представлена смоделированная зависимость коэффициента усиления по току транзистора 2T378 от интегрального потока, что позволило оценить влияние нейтронного излучения на Si БT 2T378.

Результаты виртуального эксперимента, полученные в ходе приборнотехнологического моделирования с использованием модели радиационных эффектов, использовались в дальнейшем специалистами ОАО «НПП «Пульсар» для анализа изменения времени жизни в зависимости от интегрального потока.



Рис. 4.70. Смоделированная зависимость коэффициента усиления по току транзистора 2T378 от интегрального потока

В результате сквозного TCAD-SPICE моделирования по данным виртуального эксперимента были определены параметры базовой модели БТ и дополнительный набор радиационно-зависимых параметров унифицированной SPICE-RAD-модели.

При моделировании характеристик биполярного транзистора при воздействии нейтронного излучения необходимо учитывать только объемную составляющую радиационно-индуцированного тока, так как при воздействии нейтронов деградация характеристик БТ в основном происходит из-за структурных эффектов. В связи с этим, в разработанной макромодели при учете нейтронного излучения поверхностной составляющей радиационно-индуцированного тока можно пренебречь, что в свою очередь упрощает SPICE-RAD-модель и уменьшает количество ее параметров.

Результатом сквозного TCAD-SPICE моделирования является параметры базовой модели Гуммеля-Пуна Si БТ 2Т378: IS= $3 \cdot 10^{-17}$ A, NF = 1,01, BF = 55, ISE = $7 \cdot 10^{-14}$ A, NE = 2,00, VAF = 10 B, VAR = 15 B, IKF = $1 \cdot 10^{-3}$, NKF = 0,2, re = 1 OM, RB = 5 OM, RC = 35 OM, а также набор дополнительных параметров SPICE-RAD-макромодели для объемного радиационно-индуцированного тока и сдвига напряжения насыщения: Kd=1, $7 \cdot 10^{-12}$ 1/pad, Isd=1, $0 \cdot 10^{-15}$ A, ned=1,82, V=0,15 B, g=-0,13 B, h=1, $2 \cdot 10^{-12}$ 1/pad.

На рис. 4.71 - 4.73 приведены сравнения результатов виртуального эксперимента в TCAD и результатов SPICE моделирования для Si БT 2T378 при потоке нейтронов 1.10¹³, 4.10¹³, 1.10¹⁴ н/см².



Рис. 4.71. Характеристика Гуммеля (а) и коэффициент усиления по току (б) Si БT 2T378 до и после облучения потоками нейтронов 1·10¹³, 4·10¹³, 1·10¹³ н/см²

На рис. 4.72 – 4.73 представлены результаты моделирования выходных характеристик Si БT до и после облучения потоком нейтронов 4·10¹³ н/см².



Рис. 4.72. Выходные характеристики Si БТ 2Т378 до облучения



потоком нейтронов 4·10¹³ н/см²

Как видно из представленных рис. 4.71-4.73 расхождение между смоделированными характеристиками Si БТ 2Т378 в TCAD и SPICE не превышает 10%, что является удовлетворительным для прогнозирования параметров и характеристик БТ. Таким образом, результатами сквозного TCAD-SPICE моделирования является SPICE-RAD-макромодель Si БТ 2T378, с использованием которой можно проводить схемотехническое проектирование аппаратуры с учетом радиационных эффектов, а также TCAD модель Si БТ 2T378, которую можно использовать для повышения радиационной стойкости биполярного транзистора с использованием модели радиационных эффектов, с последующим уточнением параметров его SPICE-модели и использования ее при схемотехническом проектировании.

4.1.2 Пример сквозного TCAD-SPICE моделирования SiGe ГБТ технологии 8WL при воздействии нейтронного излучения

Работы по сквозному TCAD-SPICE моделированию были проведены на примере SiGe ГБТ компании IBM, изготовленного по технологии 8WL с проектной нормой 130 нм с параметрами: β =250, $f_{\rm T}$ = 100 ГГц, $f_{\rm max}$ = 200 ГГц.

В рамках сквозного TCAD-SPICE моделирования была создана структура SiGe ГБТ 8WL, представленная на рис. 4.74 (б). Структура SiGe ГБТ 8WL отличается от других технологий IBM более короткой глубокой щелевой изоляцией STI (~3 мкм) и более слабым легированием коллектора. Подробное описание структуры и ее отличие от других технологий описано в работе [94].



Рис. 4.74. Схематичное изображение (а) и структура SiGe ГБТ 8WL, полученная в TCAD (б)

Далее проводилось моделирование (для получения результатов виртуального эксперимента) электрических характеристик SiGe ГБТ 8WL до облучения и сравнение их с экспериментальными данными. Для калибровки модели радиационных эффектов были получены экспериментальные характеристики Гуммеля до и после облучения из зарубежной работы [57]. После калибровки модели SiGe ГБТ было проведено приборнотехнологическое моделирование его структуры с учетом влияния нейтронного излучения. Результаты сравнения, а также анализ влияния нейтронного излучения представлены в Главе 2.

Основной целью сквозного TCAD-SPICE моделирования является определение параметров базовой модели и набор дополнительных параметров SPIC-модели. Поэтому из результатов TCAD моделирования, а именно, из входных и выходных ВАХ, были VBIC: определены следующие основные параметры базовой модели IS = $5 \cdot 10^{-18}$ A, NEI = 0,97, IBEI= $3 \cdot 10^{-21}$, IBEN= $3,39 \cdot 10^{-16}$ A, NEN=1,735, VEF= 103 B, VER= 17 В, IKF=0,0004 А, RE=8,6 Ом, RBX=9 Ом, RCX=60 Ом и набор дополнитель- $1 \cdot 10^{-17}$ A, SPICE-RAD-модели: I_{sd} ных параметров = 1,62, n_{ed} $K_d = 5 \cdot 10^{-13}$ 1/рад, $n_{es} = 1.95$, V = 0.09 B, g = 0.019 B, $h = 1.5 \cdot 10^{-15}$ 1/рад.

На рис. 4.75 - 4.77 показаны входные и выходные характеристики, а также коэффициент усиления по току SiGe ГБТ до и после облучения для потоков нейтронов $\Phi_n=2\cdot 10^{13}$ н/см² и $\Phi_n=1\cdot 10^{14}$ н/см².



Рис. 4.75. Характеристика Гуммеля (а) и коэффициент усиления (б) по току SiGe ГБТ 8WL до и после облучения с потоке нейтронов 2·10¹³ н/см² и 1·10¹⁴ н/см²



Рис. 4.76. Выходная характеристика SiGe ГБТ при потоке нейтронов 2·10¹³ н/см².



Рис. 4.77. Выходная характеристика SiGe ГБТ при потоке нейтронов 1·10¹⁴ н/см².

Из графиков рис. 4.75 - 4.77 видно, что максимальное расхождение между моделирования по TCAD и SPICE моделям характеристик в области рабочих токов не превышает 10%.

Результатами сквозного TCAD-SPICE моделирования SiGe ГБТ является TCAD модель SiGe ГБТ 8WL с учетом радиационных эффектов, а также SPICE-RAD-макромодель SiGe ГБТ 8WL для схемотехнических расчетов ИС и БИС, которая включает основные параметры базовой модели VBIC и набор дополнительных параметров для учета радиационных эффектов.

4.2 Оценка влияния поверхностных эффектов на радиационную стойкость СВЧ эпитаксиально-планарного n-p-n Si БТ 2Т391 при воздействии гамма-излучения

Эпитаксиально-планарные структуры n-p-n Si БТ 2Т391 разрабатываются ОАО "НПП "Пульсар" и предназначены для применения во входных и последующих каскадах усилителей сверхвысоких частот в составе гибридных интегральных микросхем, которые входят в аппаратуру специального назначения. Для усовершенствования технологии и увеличения радиационной стойкости Si БТ 2Т391 были проведены исследования влияния гамма-излучения в рамках НИОКР.

Для исследования в TCAD была воссоздана технологическая карта и топология транзистора 2T391 (см. рис. 4.78).



Рис. 4.78. Топология транзистора 2Т391

После воссоздания технологической карты транзистора 2T391 с помощью расчетов в TCAD была получена структура, разрез которой по сечению А-А (см. рис. 4.78), изображен на рис. 4.79. На рис. 4.80 показано распределение легирующей примеси по центру эмиттера БТ 2T391, профиль легирования совпадает с реальным распределением примеси.


Рис. 4.79. Структура БТ по сечению А-А



Рис. 4.80. 1D распределение легирующей примеси по центру эмиттера X = 20 мкм

На следующем этапе было проведено моделирование электрических характеристик БТ до облучения, но с подключенной моделью, учитывающее гамма-излучение с суммарной поглощенной дозой $D_{\gamma} = 0$. На рис. 4.81 представлены результаты сравнения характеристик исходного транзистора 2ТЗ91, полученных в результате TCAD моделирования и данных эксперимента.

109



Рис. 4.81. Сравнение рассчитанных входных характеристик (а) и коэффициента усиления (б) по току исходного транзистора 2T391



Рис. 4.82. Граничная и максимальная частота усиления исходного транзистора 2T391

В таблице 4.6 приведены сравнения параметров исходного транзистора 2Т391, полученных из технических условий и с помощью TCAD моделирования транзистора.

110

Параметр	Данные из ТУ	Значения, получившиеся при моделировании в САПР
Пробивное напряжение ба- за-эмиттер <i>U_{кэ}, В</i>	10,00	8,90
Пробивное напряжение ба- за-эмиттер U _{кб} , В	15,00	14,50
Граничная частота усиления, ГГц	1,00	1,31
Максимальная частота усиления, ГГц	3,60	3,69

Таблица 4.6. Сравнение параметров исходного транзистора 2Т391, полученных из технических условий и с помощью TCAD моделировании транзистора

После того, как исходный транзистор подобран, проводится моделирование с учетом гамма-излучения.

На рис. 4.83 – 4.84 представлены результаты сравнение характеристики Гуммеля и коэффициента усиления по току 2Т391 до и после воздействия гамма-излучения.



Рис. 4.83. Характеристики Гуммеля БТ 2Т391 до и после воздействия гаммаизлучения с суммарной поглощенной дозой 1·10⁶, 1·10⁷ рад



Рис. 4.84. Коэффициент усиления по току 2Т391 до и после воздействия гаммаизлучения с суммарной поглощенной дозой 1·10⁶, 1·10⁷ рад

Из представленных рис. 4.83 – 4.84 характеристик видно, что экспериментальные и смоделированные результаты достаточно хорошо согласуется, а расхождение между ними составляет не более 20%.

Далее для оценки влияния поверхностных эффектов были определены значения заряда поверхностных состояний для структуры Si БT 2T391. Концентрация поверхностных состояний варьируется при изготовлении полупроводниковых приборов и может быть подобрана для определенных значений. Поэтому зная эту зависимостью (см. рис. 4.85) можно обеспечить требуемые уровни радиационной стойкости.



Рис. 4.85. Зависимость заряда поверхностных состояний от поглощенной дозы

4.3 Применение SPICE-RAD-модели для схемотехнического моделирования фрагментов ИС, подвергнутых воздействию различных видов радиации

4.3.1 Пример применения разработанной SPICE-RAD-макромодели для расчета аналоговых схем специального назначения с учетом электронного излучения

Разработанные математические модели для схемотехнического моделирования использовались в научно-техническом отчете ТАИК.226001.377 в рамках НИР «Создание системы управления поворотами БС КА» на предприятии АО "Корпорация "ВНИИЭМ".

С использованием данных моделей была проведена оценка радиационной стойкости схем модуля электроники (1401УД2А, 140УД601А, 140УД7, 1НТ251, 2ТС622А, 198НТ1БТ1ВК и др.) управляющего приводами для ориентации солнечных батарей. Оценка радиационной стойкости схем модуля электроники проводилась по отношению к воздействию электронного и протонного излучения. Были выявлены критичные узлы и элементы.

Модуль электроники состоит из дискретных элементов или микросхем со средней степенью интеграции, поэтому для каждого типа элементов были созданы компактные модели. Для определения параметров отдельных транзисторов и микросхем были использованы транзисторы и микросхемы из летной партии. Схемотехническое моделирование схем проводилось в HSpice фирмы Synopsys.

Для проведения исследования использовался измерительный стенд. Испытания при воздействии электронного излучения проводились в ИФХиЭ РАН на линейном ускорителе. Оценка влияния протонного излучения проводилась с использованием гамма-нейтронных установок. При этом уровни воздействующих факторов по ионизационной и структурной составляющей были пересчитаны в эквивалентные повреждения, вызванные протонным излучением.

Для моделирования характеристик транзисторов и микросхем использовалась базовая модель Гуммеля-Пуна. Для определения параметров автором были проведены измерения характеристик элементов до и после воздействия электронов с дозами от 10 крад до 100 крад. Для каждого промежуточного значения дозы измерялся стандартный набор характеристик. Экстракции параметров транзисторов до и после воздействия электронного излучения проводилась согласно процедуре, описанной в 3.2. Для учета влияния электронного излучения на микросхемы были определены параметры транзисторов, входящих в состав этих микросхем, после чего путем подгонки под эксперимент были определены и радиационно-зависимые параметры.

Ниже представлен пример схемотехнического моделирования ОУ 140УД7 с учетом влияния электронного излучения. Этот ОУ является классическим примером и наиболее сбалансированного ОУ, часто используемого в практических разработках.

Для схемотехнического моделирования в HSpice была собрана электрическая схема 140УД7, приведённая на рис. 4.86.



Рис 4.86. Электрическая схема 140УД7

Далее представлены сравнения результатов схемотехнического моделирования и экспериментальных данных для 140УД7. Результаты моделирования смещения нуля – 690,497 мкВ, а по экспериментальным данным оно составило 851,326 мкВ. На рис. 4.87 и 4.88 приведены сравнения экспериментальных и смоделированных амплитудночастотных и фазо-частотных характеристик, соответственно.



Рис 4.87. Сравнение смоделированной и экспериментальной амплитудночастотной характеристики 140УД7 до облучения



Рис 4.88. Сравнение смоделированной и экспериментальной фазо-частотной характеристики 140УД7 до облучения

Как видно из представленных выше рисунков, расхождение между экспериментальными данными и результатами моделирования не превышает 20%.

На рис. 4.89 представлено сравнение экспериментальных (показаны пределы 20% отклонения от экспериментальных данных) и смоделированных результатов коэффициента радиационных повреждений, который определяется как отношение коэффициента усиления ОУ после облучения $K_U(D)$ к значению до облучения $K_U(0)$: $\beta = K_U(D)/K_U(0)$.



Рис 4.89. Сравнение экспериментального и смоделированного радиационного коэффициента повреждения β ОУ 140УД7 от дозы

Как видно из рис. 4.89 наблюдается хорошее совпадение с экспериментальными данными. На рис. 4.90 приведена амплитудно-частотная характеристика 140УД7 после воздействия электронного излучения.



Рис 4.90. Сравнение экспериментальной и смоделированной амплитудночастотной характеристики 140УД7 после электронного излучения

Для определения реальной радиационной стойкости 140УД7 проводилось схемотехническое моделирование без компенсации смещения нуля при увеличении поглощённой дозы. Уровень радиационной стойкости 140УД7 определялся по максимальному уровню дозы электронного излучения, когда не происходит нелинейных искажений вы-





Рис 4.91. Выходной сигнал ОУ 140УД7 до и после облучения с дозами D= 0 рад, 30 крад, 60 крад, 90 крад .

Реальная радиационная стойкость 140УД7 составила 86 крад, что соответствует заявленным значениям ТУ для этого ОУ и подтверждается результатами моделирования. Расхождение между смоделированными и экспериментальными данными не превысило 25% при суммарной поглощенной дозе до уровней 86 крад.

4.3.2 Использование разработанной модели для схемотехнического расчёта операционных усилителей, изготовленных по комплементарной биполярной технологии

В рамках НИОКР, которая проводилась в ОАО "НПП "Пульсар", были исследованы статические параметры операционных усилителей, изготовленных по комплементарной биполярной технологии с шириной эмиттерной промывки 0,6 мкм, граничные частоты n-p-n/p-n-p составляют 8,5/8 ГГц. Схема сборки операционного усилителя приведена на рис. 4.92.



Рис. 4.92. Схема сборки операционного усилителя

Для исследования операционного усилителя были изготовлены тестовые кристаллы, содержащие наборы n-p-n и p-n-p биполярных транзисторов (см. рис. 4.93). Площади эмиттеров транзисторных сборок n-p-n составили $S_9 = 1382,4$ мкм² (для трех транзисторов) и для p-n-p $S_9 = 1036,8$ мкм² (для трех транзисторов).

Характеристики тестовых транзисторов измерялись на специализированном стенде на базе измерительной системы Agilent. Исследования влияния радиационного воздействия проводились на линейном ускорителе электронов в ИФХиЭ РАН. Для исследований измерялись входные и выходные ВАХ тестовых транзисторов.

Автором были разработаны SPICE-RAD-макромодели для Si транзисторных кристаллов n-p-n-типа 455 и вертикальных p-n-p-типа 456 с учетом влияния электронного излучения. Структура полупроводникового кристалла тестовых транзисторных сборок транзисторов n-p-n-типа 455 и вертикальные p-n-p-типа 456 приведен на рис. 4.93.

Для моделирования исходных транзисторных сборок 455 и 456 использовалась модель Гуммеля-Пуна.



Рис. 4.93. Расположение n-p-n/p-n-р транзисторов на кристалле

Для моделирования транзисторных сборок 455 и 456 с учетом электронного излучения использовались иерархическая структура, в которой каждый тип транзистора описывался собственной макромоделью:

<u>– Для n-p-n:</u>.SUBCKT subNPN V1 B1 E1

+param D=0 Issmax='1.755e-10' Ks='3.1e-7' Kd='2.5e-4' Nes='2.519 kT=0.025 Isd='6e-16' ned=1.7 V0=0.083 g=0.0819 h=1e-7

Q1npn C1 B1 E1 GP

G1 B1 E1 Cur='3e-10'

```
G2 B1 E1 Cur='(Issmax * (1 - exp(- ks * D)))*(exp((V(B1)-V(E1))/(Nes * kT)) - 1)'
G4 B1 E1 Cur='Isd * (1 + Kd * D)* (exp((V(B1)-V(E1))/(Ned * kT)) - 1)'
```

```
E5 C1 V1 Vol='V0+g* exp(- h*D)* ( 1 - exp ( (-V(C1)-V(E1)) / ( Nes * kT ) ) ) ) '
```

.ends

```
<u>– Для p-n-p:</u>.SUBCKT subPNP V1 B1 E1
```

+param Issmax='2.0e-12' ks='7.5e-07 ' Kd='4.5e-4' Nes='2.15' kT=0.025 Isd='2e-19' Ned=1.2 V=0.01 g=0.001 h='1.1e-6' D='0'

Q1npn C1 B1 E1 0 GP

```
G1 E1 B1 Cur='3.5e-11'
```

```
G2 B1 E1 Cur='-(Issmax*(1 - exp(-ks*D)))*(exp((V(E1) - V(B1))/(Nes*kT)) - 1)'
```

```
G4 B1 E1 Cur='-Isd * (1 + Kd * D)*(exp((V(E1) - V(B1))/(Ned * kT)) - 1)'
```

```
E5 C1 V1 Vol='V+g* exp(- h*D)* ( 1 - exp ( (-V(C1)-V(E1)) / ( Nes * kT ) ) ) ) '
```

.ends

Для моделирования в HSpice была собрана электрическая схема включения транзисторов, которая приведена на рис. 4.94 для транзисторов n-p-n типа, а для p-n-p типа использовалась аналогичная схема, а также схема с шестью параллельными транзисторами. На рис. 4.95 – 4.97 представлены сравнение измеренных и смоделированных результатов до и после воздействия электронного излучения с дозами $2 \cdot 10^5$ рад, $5 \cdot 10^5$ рад, $7 \cdot 10^5$ рад, $1 \cdot 10^6$ рад. Точками на графиках отмечены экспериментальные данные, а линиями результаты моделирования. Для моделирования использовались следующие параметры: 1) для транзисторов n-p-n типа $I_{ssmax}=1,755 \cdot 10^{-10}$, $K_s=3,1 \cdot 10^{-7}$, $K_d=2,5 \cdot 10^{-4}$, $N_{es}=2,519$, kT=0,025, $I_{sd}=6 \cdot 10^{-16}$ $n_{ed}=1,7$ $V_0=0,083$ g=0,0819 $h=1 \cdot 10^{-7}$; 2) для транзисторов p-n-p типа $I_{ssmax}=2 \cdot 10^{-12}$, $K_s=7,5 \cdot 10^{-7}$, $K_d=4,5 \cdot 10^{-4}$, $N_{es}=2,15$, kT=0,025, $I_{sd}=2 \cdot 10^{-19}$, $n_{ed}=1,2$, $V_0=0,01$, g=0,001, $h=1,1 \cdot 10^{-6}$



Рис. 4.94. Схема включения трех транзисторов n-p-n типа для эксперимен-



тального исследования их характеристик

Рис. 4.95. Характеристика Гуммеля для транзисторных сборов из трех транзисторов n-p-n (а) и p-n-p (б) типа







трех транзисторов n-p-n (а) и p-n-р (б) типа

121

a)



0)

Рис. 4.97. Выходная характеристика трех транзисторов n-p-n (а) и p-n-p (б) типа

Из анализа характеристик на рис. 4.95 – 4.97 было определено, что разработанная модель позволяет описывать деградацию характеристик Si БT с ошибкой не более 5-10% до уровней поглощенной дозы 5.10⁶ рад.

Разработанная модель Si БТ использовалась для математического моделирования различных аналоговых компонентов (операционные усилители, компараторы и т.п.), выполненных на основе транзисторов из транзисторных сборок 455 и 456, с учетом воздействия электронного излучения до уровней поглощенной дозы 5.10⁶ рад.

Далее исследовались характеристики стойкости биполярного операционного усилителя, для этого были проведены измерения смещения нуля, коэффициента усиления и входного тока при тех же уровнях поглощенной дозы, что и для тестовых образцов. Приборы были собраны в специальную оснастку (см. рис. 4.98).

Разработанная модель и база данных по SPICE-параметрам n-p-n и p-n-p транзисторов были переданы специалистам ОАО «НПП «Пульсар» для проведения работ по моделированию аналогичных операционных усилителей [93] при дозах от 0 до 1200 крад.



Рис. 4.98. Оснастка операционного усилителя

4.3.3 Пример SPICE-RAD-модели Si БT и SiGe ГБТ, учитывающей гамма-излучение

При моделировании характеристик биполярного транзистора при воздействии гамма-излучения необходимо учитывать вклад в радиационно-индуцированный ток не только поверхностной составляющей, но при дозах более 5.10⁵ рад, также необходимо учитывать объемную составляющую.

Пример использования разработанной макромодели для расчета BAX Si БТ и SiGe ГБТ с учетом влияния гамма-излучения. Для моделирования были выбраны транзисторы:

– Si БТ 2Т378 с параметрами: коэффициент усиления по току β = 70, граничная частота $f_{\rm T}$ = 1,9 ГГц и максимальная частота $f_{\rm max}$ = 5,1 ГГц;

– SiGe ГБТ компании IBM, изготовленный по технологии 8HP с проектной нормой 130 нм с параметрами: $\beta = 450, f_T = 100 \Gamma \Gamma \mu, f_{max} = 200 \Gamma \Gamma \mu.$

Для данных транзисторов были использованы экспериментальные входные и выходные характеристики до и после облучения гамма-квантами, которые сравнивались с результатами SPICE-моделирования с помощью разработанной модели. Для 2T378 были проведены экспериментальные исследования по облучению гамма-квантами на установке ГОИС-5 в АО «НПП «Пульсар». Измерения характеристик проводилось на автоматизированной подсистеме, в которую входят стандартные измерительные приборы.

Для моделирования входных и выходных характеристик БТ с учетом воздействия гамма-излучения были определены следующие параметры SPICE модели:

1) <u>для SiGe ГБТ</u>: $I_{sd} = 1 \cdot 10^{-15}$ A, $n_{ed} = 1,69$, $I_{ssmax} = 1,34 \cdot 10^{-13}$ A, $k_s = 2,2 \cdot 10^{-5}$ 1/рад, $K_d = 8 \cdot 10^{-11}$ 1/рад, $n_{es} = 2,5$, V = 0,23 B, g = 0,229 B , $h = 1,95 \cdot 10^{-6}$ 1/рад, $K_{AVC1} = -6,0 \cdot 10^{-9}$ 1/рад, $K_{AVC2} = -5 \cdot 10^{-9}$ 1/рад;

2) <u>для Si БT:</u> $I_{sd} = 2 \cdot 10^{-16}$ A, $n_{ed} = 1,73$, $I_{ssmax} = 2,5 \cdot 10^{-14}$ A, $k_s = 5,5 \cdot 10^{-8}$ 1/рад, $K_d = 1,6 \cdot 10^{-6}$ 1/рад, $n_{es} = 2,01$, $v=2,05 \cdot 10^{-1}$ B, $g = 1,99 \cdot 10^{-1}$ B, $h = 1,2 \cdot 10^{-6}$ 1/рад.

На рис. 4.99 – 4.100 приведены коэффициент усиления по току и выходная характеристика для SiGe ГБТ до и после воздействия гамма-излучения с суммарной поглощенной дозой 6.10⁵ рад, 1.10⁶ рад, 3.10⁶ рад, 6.10⁶ рад.



Рис. 4.99. Характеристика Гуммеля для SiGe ГБТ до (1) и после воздействия гаммаизлучения с суммарной поглощенной дозой 6·10⁵ рад (2), 1·10⁶ рад (3),

3·10⁶ рад (4) и 6·10⁶ рад (5)



Рис. 4.100. Выходные характеристики SiGe ГБТ до (1) и после облучения с суммарной поглощенной дозой 6·10⁶(2) и 30·10⁶ (3)рад

На рис. 4.101 – 4.104 приведены результаты сравнения экспериментальных данных и результатов SPICE моделирования для Si БT до облучения и после воздействия гамма-излучения с суммарной поглощенной дозой 1.10⁴ и 1.10⁵ рад.



Рис. 4.101. Коэффициент усиления по току Si БТ до и после облучения



Рис. 4.102. Выходные характеристики Si БТ до облучения





поглощенной дозой 1.104 рад



Рис. 4.104. Выходные характеристики Si БТ после облучения с суммарной поглощенной дозой 1·10⁵ рад

Как видно из представленных на рис. 4.99 – 4.104 данных, расхождения между измеренными и смоделированными характеристиками Si БT и SiGe ГБT не превышают 10-15%, что является удовлетворительным для прогнозирования параметров и характеристик БT при воздействии гама-излучения.

4.3.4 Пример SPICE-RAD-модели Si БT и SiGe ГБТ, учитывающей протонное излучение

В связи с ограничениями в проведении экспериментальных исследований воздействия протонного излучения на биполярные транзисторы, в настоящей работе для оценки адекватности моделирования использовались экспериментальные данные, полученные из литературных источников [41], [48], [58]-[63].

В рассмотренных выше примерах применения разработанной унифицированной SPICE-RAD-модели для расчета приборов и схем, облученных электронами, нейтронами и гамма-квантами, в качестве результатов моделирования были рассмотрены в основном статические BAX и предельные частоты усиления.

Поэтому, представляет интерес оценить степень радиационной деградации не только коэффициента усиления по току β , но и других параметров SiGe ГБТ, влияющих на схемотехнику, в частности, напряжения Эрли V_A и пробивного напряжения BV_{CEO}. На рис. 4.105 приведены выходные коллекторные BAX для транзисторов с низким и высоким значением BV_{CEO}. Характеристики ведут себя по-разному: у прибора с низким пробивным напряжением с увеличением флюенса протонов при облучении заметно деградируют (уменьшаются) все три параметра β , V_A и BV_{CEO}; у прибора с высоким пробивным напряжением β - деградирует, V_A практически не изменяется, BV_{CEO} даже возрастает.



Рис. 4.105 Выходные коллекторные характеристики для транзисторов с низким и высоким значением BV_{CEO} (4-ое поколение) [58]

Для моделирования 4-ого поколения SiGe ГБТ использовались следующие радиационно-зависимые параметры: $I_{sd} = 3 \cdot 10^{-15} \text{ A}, n_{ed} = 1,59,$ $I_{ssmax} = 7,5 \cdot 10^{-13} \text{ A}, k_s = 2,2 \cdot 10^{-16} 1/\text{рад}, K_d = 8 \cdot 10^{-11} 1/\text{рад}, n_{es} = 1,95, V = 0,13 \text{ B}, g = 0,119 \text{ B},$ $h = 5,5 \cdot 10^{-17} 1/\text{рад}, K_{AVC1} = -1,99 \cdot 10^{-14} 1/\text{рад}, K_{AVC2} = -1,921 \cdot 10^{-14} 1/\text{рад}.$ Стоит отметить, что в данном моделировании в качестве характеристики уровня воздействия протонного излучения выступает не поглощенная доза, а интегральный поток. При этом дополнительных изменений в макромодели проводить не требуется, а меняются лишь значения её радиационно-зависимых параметров.

На рис. 4.106 представлены результаты сравнения экспериментальных характеристик для коэффициента усиления по току[58] и результатов моделирования для 4-ого поколения SiGe ГБТ до и после воздействия протонного излучения.



Рис. 4.106. Коэффициент усиления по току для 4-ого поколения SiGe ГБТ до и после воздействия протонного излучения

На рис. 4.107 представлены результаты сравнения экспериментальных выходных характеристик [58] и результатов моделирования для 4-ого поколения SiGe ГБТ до и после воздействия протонного излучения.



Рис. 4.107 Выходная характеристика 4-ого поколения SiGe ГБТ с высоким пробивным напряжением

Из графиков рис. 4.106 - 4.107 видно, что максимальное расхождение между экспериментальными и расчетными характеристиками в области рабочих токов не превышает 10%.

4.4 Выводы по Главе 4

В главе представлены результаты использования сквозного TCAD и SPICE моделирования для Si БT и SiGe ГБТ, а также примеры применения TCAD и SPICE моделей, полученные при выполнении ряда НИОКР с предприятиями Росэлектроники и Роскосмоса, а также проектов по ФЦП и грантам РФФИ и НИУ ВШЭ:

Совокупность разработанных в диссертации TCAD и SPICE моделей, учитывающих влияние различных радиационных воздействий, использована в ФГБНУ "НИИ МПТ" в процессе выполнения прикладной НИР гос. рез. № 0120.0713.098 в частности:

- TCAD-RAD модели использовались для оценки радиационной деградации основных электрофизических параметров (тп, тр, S и др.) и электрических характеристик структур Si БT и SiGe ГБT с учетом разброса параметров технологии изготовления;

- SPICE-RAD модели Si БT, входящих в состав Би-КМОП-ДМОП ИС силовой электроники и модели SiGe ГБТ 0,35 0,13 мкм БиКМОП БИС для радио- и телекомму-

никационной аппаратуры для оценки радиационной стойкости цифровых и аналоговых узлов Si силовой электроники и SiGe в диапазоне воздействия протонов, электронов (гамма) и нейтронов, характерных для космических условий.

2. С помощью системы TCAD со встроенной моделью учета гамма-излучения получены прогнозные оценки влияния радиационно-индуцированных поверхностных эффектов в структуре эпитаксиально-планарного n-p-n Si БT 2T391 транзистора разрабатываемого и изготавливаемого ОАО "НПП "Пульсар" и предназначенного для применения во входных и последующих каскадах усилителей сверхвысоких частот в составе гибридных интегральных микросхем, которые входят в аппаратуру специального назначения. Результаты были использованы для выработки рекомендаций оптимизации технологического процесса и повышения радиационной стойкости.

3. Совместно со специалистами ОАО "НПП "Пульсар" исследовались, предназначенные для ГИС телеметрических систем эпитаксиально-планарные структуры n-p-n Si БТ 2Т378. С помощью системы TCAD со встроенной моделью (3)-(5) рассчитаны изменения времени жизни основных и неосновных носителей заряда в базе при воздействии нейтронов и даны оценки деградации статических и частотных параметров транзистора, а также проведено сравнение математических моделей для двух типов выражений К_т.

4. Разработанная универсальная SPICE-модель Si БT, использовалась в рамках НИОКР «Создание системы управления поворотами БС КА» на предприятии АО "Корпорация "ВНИИЭМ" для оптимизации аналоговой схемы управления модуля электроники и оценки его радиационной стойкости при воздействии электронного и протонного излучений. Были выявлены критические узлы и элементы этого модуля.

5. С помощью унифицированной SPICE-модели исследовались статические параметры операционных усилителей, изготовленных на предприятии ОАО "НПП "Пульсар", выполненных по комплементарной биполярной технологии с шириной эмиттерной промывки 0,6 мкм. Были изготовлены тестовые кристаллы, содержащие наборы n-p-n и p-n-р биполярных транзисторов с граничными частотами 8,5/8 ГГц, соответственно. Для тестовых приборов были определены параметры унифицированной SPICE-модели, которая использовалась для проектирования ряда радиационностойких операционных усилителей, изготавливаемых на предприятии.

Все перечисленные выше в п.п. 1-5 результаты подтверждены актами внедрения соответствующих предприятий.

Заключение

Разработаны и встроены в промышленные версии приборно-технологических и схемотехнических САПР модели для расчета электрофизических и электрических характеристик Si БT и SiGe ГБТ биполярных транзисторов с учетом влияния нейтронного, протонного, электронного и гамма-излучений. Применение разработанных моделей позволяет значительно расширить возможности существующих приборно-технологических и схемотехнических САПР, распространив их на расчёт радиационно-стойких БИС.

Основные научные результаты:

<u>для систем приборно-технологического моделирования:</u>

 Предложена модель, учитывающая воздействия нейтронов на основной электрофизический параметр структуры БТ – время жизни неосновных носителей заряда, для которого введены зависимости от величины флюенса и уровня инжекции и легирования активной области прибора, что впервые позволило с достаточной точностью расчетным путем оценить воздействие нейтронов на электрические характеристики Si БТ и SiGe ГБТ.

2) Предложена модель для учета воздействия гамма-излучения на характеристики Si БT и SiGe ГБT, которая помимо ранее известной зависимости скорости генерации электронно-дырочных пар в SiO₂ от поглощённой дозы, дополнительно учитывает изменение скорости поверхностной рекомбинации и накопление ловушек на границе раздела Si/SiO₂ от поглощённой дозы, что существенно повышает точность моделирования.

3) Предложена модель, учитывающая совместное влияние структурных и ионизационных эффектов, обусловленных действием протонов, на электрофизические и электрические характеристики Si БT и SiGe ГБТ. Модель включает в себя частные модели для нейтронного (п. 1) и гамма-излучений (п. 2) в сочетании с методикой определения для них флюенса и дозы, эквивалентных воздействию протонов с определенной энергией. Модель предложена впервые и позволяет с достаточной точностью оценить влияние протонов на электрические характеристики Si БT и SiGe ГБТ.

Погрешность моделирования ВАХ и частотных характеристик для всех трех моделей, учитывающих действие нейтронов, гамма-квантов и протонов в диапазонах воздействий, представляющих практический интерес, составляет 15-20%.

• <u>для систем схемотехнического проектирования на базе платформы SPICE</u>:

4) Предложена и развита унифицированная SPICE-RAD-макромодель Si БT и SiGe ГБT, которая имеет одну и ту же эквивалентную схему и систему выражений для всех видов воздействия (электронного, протонного, нейтронного и гамма-излучений). По сравнению с существующим набором разнородных версий SPICE-RAD-моделей значительно сокращается количество параметров, описывающих радиационные эффекты, упрощается методика их определения.

5) По сравнению с ранее известными SPICE-моделями в унифицированной модели дополнительно учтены эффект усиления радиационной деградации параметров от влияния «горячих» носителей и эффекты сдвига выходных коллекторных характеристик в области насыщения и лавинного пробоя, что существенно повышает точность моделирования аналоговых и аналого-цифровых схем.

Погрешность моделирования электрических характеристик фрагментов биполярных ИС и БИС, состоящих из Si БТ и/или SiGe ГБТ, подвергнутых воздействию электронного, нейтронного, протонного и гамма-излучения, составляет: 10–15% для статических ВАХ и 15–20% для динамических характеристик в широком диапазоне доз и потоков радиации.

Основные практические результаты диссертации:

Разработанные радиационные модели электрофизических эффектов встроены в промышленную САПР Sentaurus Synopsys и могут быть использованы для проектирования радиационно-стойких Si БT и SiGe ГБT, позволяя прогнозировать их электрические характеристики при воздействии нейтронного, протонного и гамма-излучений.

Унифицированная SPICE-RAD-макромодель встроена в промышленные схемотехнические САПР Eldo (Mentor Graphics), Spectre, UltraSim (Cadence), HSpice (Synopsys) и может быть использована для проектирования радиационно-стойких ИС, позволяя рассчитывать электрические характеристики Si БТ и SiGe ГБТ БИС при воздействии различных видов радиации в широком диапазоне действующего фактора. По сравнению с используемым в существующих симуляторах набором отдельных SPICEмоделей для каждого вида воздействия, унифицированная модель, общая для всех видов воздействий, описывается значительно меньшим количеством параметров, имеет более простую методику их определения, что позволяет сократить трудоемкость и время подготовки и обработки данных до и после расчета. Для пользователей разработаны полуавтоматические процедуры определения параметров биполярных транзисторов с учётом воздействия стационарного радиационного излучения на основе результатов измерений тестовых приборов по стандартным методикам или результатов приборного-технологического моделирования в системе TCAD.

Внедрение результатов работы.

Результаты диссертации были использованы на предприятиях ОАО «НПП «Пульсар», АО «Корпорация «ВНИИЭМ», ФГБНУ «НИИ ПМТ» в следующих НИОКР:

• НИР «Стойкость-ТЗЧ» и ОКР «Высотка-26».

• НИР «Исследование и разработка радиационных моделей элементов кремнийгерманиевых аналого-цифровых БиКМОП СБИС для проектирования космической радио- и телекоммуникационной аппаратуры».

• НИОКР «Создание системы управления поворотами БС КА»,

а также при выполнении 5-ти госбюджетных НИР по программам ФЦП и грантам РФФИ и научного фонда НИУ ВШЭ.

• Ряд результатов по использованию TCAD и SPICE моделей, имеющих методический характер, и примеры расчета Si БT и SiGe ГБT структур и схемных фрагментов на их основе, внедрены в учебный процесс МИЭМ НИУ ВШЭ при изучении дисциплин "Микросхемотехника", "Основы проектирования и технологии электронной компонентной базы" и "Проектирование электронной компонентной базы".

<u>Методические результаты.</u> Ряд результатов, включающих использование TCAD и SPICE моделей и примеры расчета Si БT и SiGe ГБT структур и схемных фрагментов на их основе, внедрены в учебный процесс МИЭМ НИУ ВШЭ при чтении дисциплин "Микросхемотехника", "Основы проектирования и технологии электронной компонентной базы" и "Проектирование и технологии электронной компонентной базы".

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- SPICE система схемотехнического моделирования;
- TCAD система приборно-технологического моделирования;
- БИС большая интегральная схема;
- БТ биполярный транзистор;
- ВАХ вольт-амперная характеристика;
- ГБТ гетеропереходный биполярный транзистор;
- ИС интегральная схема;
- КИП контрольно-измерительные приборы;
- МОП металл-оксид-полупроводник;
- ОУ операционный усилитель;
- ОЯЧ отдельная ядерная частица;
- ПО программное обеспечение;
- РЭА Радиоэлектронная аппаратура
- САПР система автоматизированного проектирования;
- СБИС сверхбольшая интегральная схема;
- СВЧ сверхвысокочастотные;
- ЭВМ электронно-вычислительная машина;
- ЭКБ электронная компонентная база;

Список использованной литературы

К введению.

- [1]. Colinge J. P. Silicon-on-Insulator Technology: Materials to VLSI: Materials to VLSI.
 Springer Science & Business Media. 2004;
- [2]. Математические модели, встроенные в систему TCAD, для учета влияния гаммаи нейтронного излучения на полупроводниковые приборы [Текст]/ Петросянц К.О., Кожухов М.В., Попов Д.А., Орехов Е.В. // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2012. – № 6 (131). – С. 77-82;
- [3]. Влияние изохронного и изотермического отжига на процесс восстановления коэффициента усиления по току кремниевого биполярного транзистора, подвергнутого воздействию радиации [Текст]/ Петросянц К.О., Кожухов М.В., Смирнов Д.С. // Известия вузов. Электроника. – 2013. – № 6 (104). – С. 86-88;
- [4]. Влияние параметров слоя кремний-германиевой базы на эффект саморазогрева в структуре гетеропереходного биполярного транзистора [Текст]/ Петросянц К.О., Кожухов М.В. // Известия вузов. Электроника. 2015. № 6 (110). С. 648-651;
- [5]. Схемотехнические SPICE-модели биполярных и МДП транзисторов для автоматизации проектирования радиационно-стойких БИС [Текст]/ Петросянц К.О., Харитонов И.А., Самбурский Л.М., Кожухов М.В. // Информационные технологии. – 2015. – №12 (21). – С. 916-922;

К главе 1.

- [6]. Mehandia B. Study of Electrical Characteristics of SOI MOSFET Using Silvaco TCAD Simulator [Teκcτ]// Current Trends in Technology and Sciences. – 2012. – T.1. – №. 1;
- [7]. Marlia Morsin, Mohd Khairul Amriey, Abdul Majeed Zulkipli and Rahmat Sanudin. Design, Simulation and Characterization of 50nm p-well MOSFET Using Sentaurus TCAD Software [Teκcτ] // Proceedings of MUCEET2009. –2009 г. – С. 1-3;
- [8]. SILVACO TCAD [Электронный ресурс], Simulation Standard. Volume 24. № 4, 2014, [http://www.silvaco.com/tech lib TCAD/simulationstandard/2014/index.html];
- [9]. Simon at el. TCAD Simulation for Semiconductor Processes, Devices and Optoelectronics [Teκct] // Springer Science & Business Media. 2012 г. С. 292;
- [10]. Дроздов Д.Г., Савченко Е.М. Проектирование технологических процессов изготовления кремний-германиевых гетеробиполярных транзисторов [Текст] // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем - 2014. Сборник трудов / под общ. ред. академика А.Л. Стемпковского. –М.:ИППМ РАН. – 2014 г. – Часть II. – С. 141-144;
- [11]. Виноградов Р. И. и др. Выбор оптимального маршрута моделирования диффузионных процессов с использованием САПР ТСАD [Текст]//Электронная техника. Сер. 2009 г. Т. 2. С. 65-72;

- [12]. Королев М.А., Крупкина Т.Ю., Чаплыгин Ю.А. Проблемы использования приборно-технологического моделирования как инструмента проектирования и пути их решения [Текст]// Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем - 2005. Сборник трудов / под общ. ред. академика А.Л. Стемпковского. –М.:ИППМ РАН. – 2005 г. – С. 143-150;
- [13]. Балашов А.Г., Крупкина Т.Ю., Цимбалов А.С. Критерии выбора моделей при расчете приборных характеристик субмикронных транзисторных структур [Текст]// Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем - 2005. Сборник трудов / под общ. ред. академика А.Л. Стемпковского. – М.:ИППМ РАН. – 2005 г. – С. 185-190;
- [14]. Калинин А.В., Крупкина Т.Ю. Повышение эффективности применения систем приборно-технологического моделирования [Текст] // Труды десятой международной научной конференции и школы-семинара «Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники».-Дивноморское. -Россия. -2006.- С.130-131;
- [15]. Крупкина Т.Ю. Разработка научных основ создания и совершенствования базовых элементов микроэлектроники и микросистемной техники методами приборно- технологического моделирования: диссертация. ... доктора технических наук 05.27.01— Москва, 2005. — 233 с;
- [16]. Лавлинский В.В. Научные основы синтеза виртуальной реальности для объектов проектирования радиационно-стойкой электронной компонентной базы специального назначения: диссертация. ... доктора технических наук 05.13.12— Воронеж, 2015. — 260 с;
- [17]. Johnston A.H., Plaag R.E.. Models for total dose degradation of linear integrated circuits [Tekct] // IEEE Transactions on Nuclear Science. –1987.– T. 34. C.1474-1480;
- [18]. Смолин А.А., Уланова А.В., Согоян А.В., Демидов А.А. Моделирование радиационно-индуцированных токов утечки в МОП-структурах при воздействии гамма- и рентгеновского излучений [Текст] // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем - 2014. Сборник трудов / под общ. ред. академика А.Л. Стемпковского.–М.:ИППМ РАН.– 2014 г.– Часть III.– С. 197-200;
- [19]. Зольников В.К., Потапов И.П., Таперо К.И. Моделирование сбора заряда при воздействии тяжелых заряженных частиц в КМОП элементах микросхем [Текст] // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем - 2010. Сборник трудов / под общ. ред. академика А.Л. Стемпковского. М.:ИППМ РАН. – 2010 г. – С. – 275-278;
- [20]. Sutton A. K., Cressler J. D. at el. The Effects of Proton and X-Ray Irradiation on the DC and AC Performance of Complementary (npn + pnp) SiGe HBTs on Thick-Film SOI [Teкст] // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2007.– T. 54.– №. 6.– C. 2245 – 2250;
- [21]. Graves R. J. et al. Modeling low-dose-rate effects in irradiated bipolar-base oxides [Текст] // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1998. – Т. 45. – №. 6. – С. 2352-2360;

- [22]. Put S. et al. In-situ recovery of the base current of SiGe NPN HBTs at high gamma dose levels [Teκct]//Proceeding of "Safe 2007". Netherlands. – Nov. 2007.– C. 451-456;
- [23]. Панкратов А.Е., Тарасова Е.А., Оболенская Е.С., Козлов В.А., Пузанов А.С., Оболенский С.В. Влияние радиационно-стимулированной диффузии на процессы восстановления работоспособности планарных диодов и транзисторов после импульсного гамма-нейтронного воздействия [Текст] // Научнотехнический сборник «Стойкость-2015». – г. Лыткарино. – 2015 г. – С. 63-64;
- [24]. Bellini M. et al. X-ray irradiation and bias effects in fully-depleted and partiallydepleted SiGe HBTs fabricated on CMOS-compatible SOI [Текст] // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2006. – Т. 53. – №. 6. – С. 3182-3186;
- [25]. Аверяскин А.С, Хананова А.В. Математическое моделирование полупроводниковых элементов и функционирования схем на их основе после нейтронного облучения [Текст] // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру». – 2012.
 – №. 1.– С. 46–50;
- [26]. Аверяскин А.С, Хананова А.В. Моделирование работы электронных схем при радиационном воздействии [Текст] // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2013. №. 2-1. С. 52-55;
- [27]. Крутчинский С.Г., Титов А.Е. Особенности схемотехнического проектирования радиационно-стойких ИС на АБМК [Текст] // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем - 2012. Сборник трудов / под общ. ред. академика А.Л. Стемпковского. М.:ИППМ РАН. – 2012 г. – С. 274-279;
- [28]. Петросянц К. О., Харитонов И. А. Модели МДП и биполярных транзисторов для схемотехнических расчётов БИС с учётом радиационного воздействия [Текст] // Микроэлектроника РАН. – 1994. – Т. 23. – №. 1. – С. 21-34;
- [29]. Вологдин Э.Н., Дюканов П.А., Синкевич В.Ф., Смирнов Д.С., Сурков Г.П. Учёт воздействия нейтронного облучения на биполярные ИМС ОУ при их схемотехническом моделировании. Основные свойства, параметры и базовые схемы включения мультидифференциальных операционных усилителей с высокоимпедансным узлом [Текст] / Э.Н. Вологдин, П.А. Дюканов, В.Ф. Синкевич, Д.С. Смирнов, Г.П. Сурков // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. 2014. Т. 2. № 233. С. 42 45;
- [30]. Учет воздействия нейтронного облучения на биполярные ИМС ОУ при их схемотехническом моделировании [Текст] / Э.Н. Вологдин, П.А. Дюканов, Д.С. Смирнов, Г.П. Сурков// Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА. Материалы научно-технической конференции. – М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, ФГУП «НПП «Пульсар». – 24-25 октября, 2013. – С. 243 – 246.
- [31]. Дворников О.В., Гришков В.Н. Комплексный подход к проектированию радиационно-стойких аналоговых микросхем. Часть 1.Учет влияния проникающей радиации в "Spice-подобных" программах [Текст] // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем - 2010. Сборник трудов / под общ. ред. академика А.Л. Стемпковского. М.:ИППМ РАН. – 2010 г. – С. 301-306;

- [32]. Дворников О.В. Комплексный подход к проектированию радиационно-стойких аналоговых микросхем. Часть 2. Базовые схемотехнические решения АБМК 1-3 [Текст] // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем - 2012. Сборник трудов / под общ. ред. академика А.Л. Стемпковского. М.:ИППМ РАН. – 2012 г. – С. 283-288;
- [33]. Крутчинский, С.Г., Титов, А.Е., Серебряков, А.И. Компьютерное моделирование основных динамических параметров и статических характеристик транзисторов аналогового базового матричного кристалла АБМК_1_4 в условиях температурных и радиационных воздействий [Текст] // Х Международный научно-практический семинар «Проблемы современной аналоговой микросхемотехники». – 1-2 окт. 2013 г.: материалы : в 2 ч.Ч.1.: Изд. ИСОиП (филиал) ДГТУ. – Шахты. 2013. – С.114;
- [34]. Van Uffelen M., Geboers S., Leroux P., Berghmans F.. SPICE modelling of a discrete COTS SiGe HBT for digital applications up to MGy dose levels [Teκct] // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2006. – T. 53. – №. 4. – C. 1945-1949;
- [35]. Прокопенко Н.Н., Будяков А.С., Савченко Е.М. Операционные усилители с обобщенной токовой обратной связью [Текст] // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем - 2008. Сборник трудов / под общ. ред. академика А.Л. Стемпковского. М.:ИППМ РАН. – 2008 г. – С. 330-333;
- [36]. Leroux P., De Cock W., Van Uffelen M., Steyaert M.. Modeling, Design, Assessment of 0.4 µm SiGe Bipolar VCSEL Driver IC Under γ-Radiation [Teκct] // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2009. – T. 56. – №. 4. – C. 1920 – 1925;
- [37]. Deng Yanqing T.A. Fjeldly, T. Ytterdal, M.S. Shur. Spice modeling of neutron displacement damage and annealing effects in bipolar junction transistors [Текст]// IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2003. – Т. 50. – №. 6. – С. 1873-1877;
- [38]. Mavis D. G., Eaton P. H. SEU and SET modeling and mitigation in deep submicron technologies [Teκcτ]// Proc. 45th IEEE Int. Reliability Physics Symp. – 2007. – C. 293-305;
- [39]. Hajghassem H. S., Yeargan J. R., Brown W. D., and Williams J. G.. Modelling the effects of neutron radiation on the gummel-poon parameters for bipolar npn transistors [Tekct] //Microelectronics Reliability. – 1991. – T. 31. – №. 5. – C. 969-984;
- [40]. Rinaudo O., Zimmer T., Limtouch S., Bourgoin G., Lalande P. . SPICE data base for neutron (1 MeV) radiation hardening design: permanent damage effects simulation of bipolar transistors [Teκct]// Third European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems, 1995. RADECS 95. –1995. – C. 161-164;
- [41]. Praveen K.C., Pushpa N., Prabakara Rao Y.P., Govindaraj G., Cressler J.D. and Prakash A.P.G.. Application of advanced 200GHz Si–Ge HBTs for high dose radiation environments [Tekct]// Solid-state electronics. – 2010. – T. 54. – №. 12. – C. 1554-1560;
- [42]. Montagner X., Briand R., Fouillat P., Schrimpf R. D., Touboul A., Galloway K. F., Calvet M. C., and Calvel P. Dose-rate and irradiation temperature dependence of BJT SPICE model rad-parameters [Teкct]// IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1998. – T. 45. – №. 3. – C. 1431-1437;
- [43]. Van Huylenbroeck S., Choi L. J., Sibaja-Hernandez A., Pointek A., Linten D., Dehan M., Dupuis O., Carchon G., Vleugels F., Kunnen E., Leray P., Devriendt K., Shi X. P.,

Loo R., Hizen E., and Decoutere S. A 205/275 GHz f/f airgap isolated 0.13 um BiC-MOS technology featuring on-chip high quality passives [Tekct] // Proc. in BCTM 3.3. – 2006;

К главе 2.

- [44]. TCAD Sentaurus User Manual J-2014.09 [Электронный ресурс], Synopsys;
- [45]. Радиационная стойкость изделий ЭКБ: Научное издание [Текст] / Под. ред. д-ра техн. наук, проф. А.И. Чумакова. М.: НИЯУ МИФИ. 2015. 512 с.
- [46]. Zhang S., Niu G., Cressler J. D., at el. A comparison of the effects of gamma irradiation on SiGe HBT and GaAs HBT technologies [Teκcτ]// IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2000. – T. 47. – №. 6. – C. 2521-2527;
- [47]. Niu G., Mathew S. J., at el. Total dose effects on the shallow-trench isolation leakage current characteristics in a 0.35mm SiGe BiCMOS technology [Teκcτ]// IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1999. – T. 46. – №. 6. – C. 1841-184;
- [48]. Cressler J. D., Krithivasan R., Zhang G. at el. An investigation of the origins of the variable proton tolerance in multiple SiGe HBT BiCMOS technology generations [Teκct]// IEEE Transactions on Nuclear Science.-2002.-T.49.-№.6.-C. 3203-3207;
- [49]. Put S., Simoen E., Van Huylenbroeck S., at el. Effect of Airgap Deep Trench Isolation on the Gamma Radiation Behavior of a 0.13 mm SiGe:C NPN HBT Technology [Tekct]//IEEE Transactions on Nuclear Science. –2009.–T. 4. –№.56. – C. 2198-2204;
- [50]. Kosier S. L., Shrimpf R. D., Nowlin R. N., Fleetwood D. M., DeLaus M., Pease R. L., Combs W. E., Wei A., Chai F. Charge separation for bipolar transistors [Текст] // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1993. – Т. 40. – №. 6. – С. 1276-1285;
- [51]. Moen K. A., Cressler J. D. Measurement and modeling of carrier transport parameters applicable to SiGe BiCMOS technology operating in extreme environments [Teкct] // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2010. – T. 57. – №. 3. – C. 551-561;
- [52]. Dentan M. Radiation effects on electronic components and circuits [TeκcT]// Radiation effects on electronic components and circuits //CERN Training. 2000. Τ. 11;
- [53]. Вологдин Э. Н., Лысенко А. П. Интегральные радиационные изменения параметров полупроводниковых материалов [Текст] //МИЭМ, М. – 1999;
- [54]. Gregory B.L., Gwyn C.W. Application of neutron damage models to semiconductor device studies [Tekct]// IEEE Transactions on Nuclear Science. 1970. T. 17. №. 6. C. 325-334;
- [55]. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники [Текст]/ В. М. Кулаков, Е.А. Ладыгин, В.И. Шаховцев [и др.]. – М.: Сов. Радио. – 1980.– 224 с.
- [56]. Эмпирические соотношения для зависимости коэффициента радиационного изменения времени жизни носителей заряда в кремнии при нейтронном облучении от уровня инжекции и степени легирования / Вологдин Э.Н., Смирнов Д.С. [Текст] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2010. – Т. 2. – С. 17-22;

- [57]. Diez S., Wilder M., Ullan M.et al. Radiation hardness studies of a 130 nm Silicon Germanium BiCMOS technology with a dedicated ASIC [Teκct] //Proc. TWEPP. – 2009. – C. 439-442;
- [58]. Sutton A. K. et al. Proton tolerance of fourth-generation 350 GHz UHV/CVD SiGe HBTs // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2004. – T. 51. – №. 6. – C. 3736-3742
- [59]. Barnaby H. J., Smith S. K., Scrhimpf R. D., Fleetwood D. M., and Pease R. L. Analytical model for proton radiation effects in bipolar devices [Teκct] //Nuclear Science, IEEE Transactions on. – 2002. – T. 49. – №. 6. – C. 2643-2649;
- [60]. Díez S., Lozano M., Pellegrini G., Campabadal F., Mandic I., Knoll D., B. Heinemann, and M. Ullán. Proton radiation damage on SiGe: C HBTs and additivity of ionization and displacement effects [Tekct] //IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2009. – T. 4. – №. 56. – C. 1931-1936;
- [61]. Zhang S.et al. The effects of proton irradiation on SiGe: C HBTs [TekcT] //Nuclear Science, IEEE Transactions on. – 2001. – T. 48. – №. 6. – C. 2233-2237;
- [62]. Sutton A. K. et al. A comparison of gamma and proton radiation effects in 200 GHz SiGe HBTs [Teκcτ] // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2005. – T. 52. – №. 6. – C. 2358-2365;
- [63]. Haugerud B. M. et al. Proton and gamma radiation effects in a new first-generation SiGe HBT technology [Teκct]//Solid-state electronics. – 2006. – T. 50. – №. 2. – C. 181-190;
- [64]. Petrosyants K., Vologdin E., Torgovnikov R., Smirnov D., Kozhukhov M. Si BJT and SiGe HBT Performance Modelling after Neutron Radiation Exposure [Teκct] // Proc. of 9th IEEE East-West Design & Test Intl. Symp. (EWDTS'11). Sevastopol. – Sept. 2011. – C. 267-270;
- [65]. Petrosyants K. O., Kozhukhov M.V. SiGe HBT TCAD Simulation Taking into Account Impact of Proton Radiation // Proc. of 15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS).- 2015 - C. 1 - 4;
- [66]. Poivey C. and Hopkinson G.. Displacement damage mechanism and effects [Текст] //ESA-EPFL Space Center Workshop. – 2009. – Т. 9;
- [67]. Радиационные эффекты в космосе. Часть 1. Радиация в околоземном космическом пространстве [Текст]/ Безродных И.П., Тютнев А.П., Семенов В.Т. // М.: ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ». 2014. 106 с.;
- [68]. Van Uffelen M. and Leroux P., Comeau J.P., Sutton A.K., Haugerud B.M., Cressler J.D., at el. Proton tolerance of advanced SiGe HBTs fabricated on different substrate materials [Teкct]// IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2004. – T. 51. – №. 6. – C. 3743-3747;
- [69]. Zhang S., Cressler J. D., at el. An investigation of proton energy effects in SiGe HBT technology [Teкct] // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2002. – T. 49. – №. 6. – C. 3208-3212;
- [70]. Fox R., Ramsey N. F. Low-Energy Proton Production by 160-Mev Protons [Текст] //Physical Review. – 1962. – Т. 125. – №. 5. – С. 1609;

К главе 3.

- [71]. Торговников Р.А., Кожухов М.В. Приборное и схемотехническое моделирование характеристик Si БT и SiGe ГБТ при воздействии нейтронного облучения [Текст] // Материалы X НТК молодых специалистов «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА». Тезисы докладов.– Моск. обл., г. Дубна. – 2011 г. – С. 170-172;
- [72]. Петросянц К. О., Кожухов М. В. SPICE-модели кремниевых БТ и кремний германиевых ГБТ, учитывающие влияние радиационных факторов [Текст] // Сб. науч. тр. международной НПК "Innovative Information Technologies" – М.: МИ-ЭМ НИУ ВШЭ. – 2013 г.– С. 320-326;
- [73]. Торговников Р.А., Кожухов М.В. Приборное и схемотехническое моделирование характеристик Si БT и SiGe ГБТ при воздействии нейтронного облучения [Текст] // Материалы X НТК молодых специалистов «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА». Тезисы докладов.– Моск. обл., г. Дубна. – 2011 г. – С. 170-172;
- [74]. Кожухов М.В., Торговников Р.А. Компактная SPICE-модель Si БТ и SiGe ГБТ, учитывающая воздействие нейтронного облучения [Текст] // НТК студентов, аспирантов и молодых специалистов. Тезисы докладов. – М., МИЭМ.–2012г.– С. 282-283;
- [75]. Петросянц К. О., Кожухов М. В. SPICE-модели кремниевых БТ и кремний германиевых ГБТ, учитывающие влияние радиационных факторов [Текст]// Сб. науч. тр. международной НПК "Innovative Information Technologies" – М.: МИ-ЭМ НИУ ВШЭ. – 2013 г. – С. 320-326;
- [76]. Petrosyants K., Kozhukhov M.. SPICE Model Parameters Extraction Taking into Account the Ionizing Radiation Effects [Tercer]// Proc. of 12th IEEE East-West Design & Test Intl. Symp. (EWDTS`2014). Sept. 2014. C. 304-307;
- [77]. Кожухов М.В.. Схемотехническая SPICE модель, учитывающая воздействие гамма-излучения на характеристики кремниевых БТ и кремний-германиевых ГБТ [Текст]// НТК студентов, аспирантов и молодых специалистов. Тезисы докладов. – М.: МИЭМ. – 2014 г. – С. 239-240;
- [78]. Petrosyants K.O., Kharitonov I.A., Kozhukhov M.V., Sambursky L.M. Expanding Commercial Spice Possibilities in the Field of Extreme Environment Electronics Design by Using New BJT and MOSFET Models with Account for Radiation Influence [Terct]// Innovative Information Technologies: Materials of the International scientific – practical conference. Part 3. /Ed. Uvaysov S. U.–M.: HSE, Prague. – 2014. – C. 244-253;
- [79]. Петросянц К. О., Кожухов М. В. Схемотехническая SPICE-модель биполярного транзистора, учитывающая влияние различных видов радиации [Teкст]// Фундаментальная наука и технология - перспективные разработки/ Fundamental science and technology - promising developments – Т. 3 – Вып. III. CreateSpace. –2014 г. – С. 23-26;
- [80]. ГОСТ 18604.26-85. Транзисторы биполярные. Методы измерения электрических параметров [Текст]. Введ. 1986–01–07. М.:Изд-во стандартов, 1986. 10 с.: ил;

- [81]. Афонский А. А., Дьяконов В. П. Электронные измерения в нанотехнологиях и в микроэлектронике [Текст]//М.: ДМК-Пресс. 2011;
- [82]. Петросянц К. О., Харитонов И. А. Модели МДП и биполярных транзисторов для схемотехнических расчётов БИС с учётом радиационного воздействия [Текст]// Микроэлектроника РАН. – 1994. – Т. 23. – №. 1. – С. 21-34;
- [83]. Petrosyants K. O., Kharitonov I. A., Sambursky L. M. et al. Simulation of Total Dose Influence on Analog-Digital SOI/SOS CMOS Circuits with EKV-RAD macromodel [Tekct] // Proc. of 10th IEEE East-West Design & Test Intl. Symposium (EWDTS'12), Sept. 2012. – C. 60–65;
- [84]. Реализация базовых методов радиационных испытаний ЭКБ на основе аппаратно-программного комплекса аппаратуры National Instruments/ Бобровский Д.В. и др. [Текст] // Известия вузов. Электроника. 2012. № 5 (97). С. 91-104;
- [85]. Петросянц К. О., Гоманилова Н.Б., Харитонов И. А. и др. Проектирование радиационно-стойкого прецизионного усилителя на базе КНС КМОП технологии [Текст] // Сб. науч. тр.в «Электроника, микро и наноэлектроника» / под ред. В.Я. Стенина. – М., МИФИ, – 2013. – С 196-302;
- [86]. Petrosyants K.O., Kharitonov I.A., Sambursky L.M. Hardware-Software Subsystem for MOSFETs Characteristic Measurement and Parameter Extraction with Account for Radiation Effects [Tekct]//Adv. Materials Research. – 2013. – T. 718. – C. 750-755;
- [87]. Li M., Fleetwood D. M., Schrimpf R. D. et al. Including radiation effects and dependencies on process-related variability in advanced foundry spice models using a new physical model and parameter extraction approach [Tekct] // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2011. – T. 58. – №. 6. – C. 2876-2882;
- [88]. Petrosyants K. O., Kharitonov I. A., Sambursky L. M., Kozhukhov M. V. IV-Characteristics Measurement Error Resulting from Long Cables for Irradiated Bipolar Junction Transistors [Teκct]// Adv. Materials Research.-2015.- T. 1083 - C. 185-189;
- [89]. Петросянц К. О., Харитонов И. А., Самбурский Л.М., Макеев А.С. Определение параметров SPICE и IBIS моделей ЭКБ для учета эффектов радиационных воздействий на основании результатов измерения их характеристик [Текст] // Научно-технический сборник. «Стойкость 2015». – Мос. Обл., г. Лыткарино. – 2015. – С. 109-110.
- [90]. Петросянц К. О., Харитонов И. А., Самбурский Л.М. и др. Исследование характеристик элементной базы аналоговых КНИ КМОП схем, изготовленных по технологии XFAB, с учетом суммарной поглощенной дозы [Текст] //Электроника, микро-и наноэлектроника: сб. науч. тр.–М.: МИФИ. – 2009. – С. 57-66;
- [91]. Agilent 85190A, IC-CAP 2006 User's Guide [Электронный ресурс].
- [92]. Yang D., Gamal A., Fowler B., Tian H.. A 640x512 CMOS Image Sensor with Ultra Wide Dynamic Range Floating-Point Pixel Level ADC [Текст] // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 1999. – Т. 34. – №. 12. – С. 1821-1834

К главе 4.

- [93]. Виноградов Р.Н., Корнеев С.В., Ксенофонтов Д.Л., Савченко Е.М. Архитектура современных быстродействующих операционных усилителей [Текст] // Материалы международной научно-технической конференции «Электроника и информатика – 2005». – Москва. – 2005. – С. 123-124;
- [94]. Cressler J. D. Fabrication of SiGe HBT BiCMOS Technology [Текст] // CRC Press. 2007. 260 с.

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора ОАО «НПП «Пульсар» д.т.н., профессор

В.Ф. Синкевич

2015 г.

открытого акционерного общества «Научно-производственное предприятие «Пульсар» (г. Москва) о внедрении результатов кандидатской диссертации Кожухова Максима Владимировича на тему «Разработка и исследование моделей радиационных воздействий для расчета характеристик кремниевых и кремний-германиевых биполярных транзисторов с помощью системы TCAD» представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.12 – «Системы автоматизации проектирования».

М.П.

Настоящий акт составлен в том, что результаты кандидатской диссертационной работы Кожухова М.В. были использованы при выполнении НИОКР в ОАО «НПП «Пульсар»:

- методы приборно-технологического моделирования кремниевых и кремний-германиевых гетеропереходных биполярных транзисторов с учетом воздействия нейтронного и гамма излучения;
- 2. результаты облучения на линейном ускорителе электронов с уровнями поглощенных доз до 10 Мрад образцов прп и рпр транзисторов с граничными частотами более 8,5 ГГц, выполненных по субмикронной комплементарной биполярной технологии;
- 3. библиотеки схемотехнических моделей на основе универсальной макромодели, учитывающей радиационные изменения при облучении в диапазоне доз до 5 Мрад, для биполярных прп и рпр транзисторов с граничными частотами более 8,5 ГГц, выполненных по субмикронной комплементарной биполярной технологии.
Вышеуказанные результаты были использованы при выполнении НИР «Стойкость-ТЗЧ» для проектирования стойких к дозовым эффектам аналоговых микросхем специального назначения на основе субмикронных комплементарных биполярных транзисторов имеющих граничные частоты более 8,5 ГГц и кремний-германиевых гетеропереходных биполярных транзисторов с граничными частотами более 30 ГГц, что позволило сократить объем проводимых испытаний и выявить наиболее перспективные схемы аналоговых узлов в части их радиационной-стойкости.

Кроме того, в рамках ОКР «Высотка-26», по созданию ряда радиационно-стойких твердотельных СВЧ генераторов, управляемых напряжением, полученные результаты были использованы для обоснования выбора технологии изготовления транзисторов по критерию обеспечения заданных уровней стойкости к спецфакторам.

Разработанные в диссертации библиотеки схемотехнических моделей позволяют включать их в состав системы автоматизированного проектирования Cadence Virtuoso (Spectre) и могут использоваться при проектировании аналоговых интегральных схем специального назначения с повышенной радиационной стойкостью.

Начальник отделения №8 «ЦП» ОАО «НПП «Пульсар», к.т.н.

Начальник отдела ЦП-1 отделения №8 «ЦП» ОАО «НПП «Пульсар», к.т.н.

Начальник сектора отдела 51 отделения №5 ОАО «НПП «Пульсар», к.т.н.

Старший научный сотрудник отдела №51 ОАО «НПП «Пульсар», к.т.н. Е.М. Савченко

А.С. Будяков

A Coparias

Э.Т. Аврасин

Д.В. Сидоров

0002201

федеральное государственное бюджетное научное учреждение

«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ» (ФГБНУ «НИИ ПМТ»)

> Юр. адрес: 115054, г. Москва, ул. М. Пионерская, 12. Факт. адрес: 105120, г. Москва. ул. Н. Сыромятническая, 11 Тел./факс (495)788-49-03, тел. (916)496-82-95, e-mail: info@niipmt.ru, niipmt@mail.ru, web-caium: www.niipmt.ru ОГРН 1027739914025, ОКВЭД 73.10, ОКПО 41103195, ОКТМО 45376000

Mcx. № 156 om 16 gerasha 20152. Ha № om_ 201_ 2.



внедрения результатов кандидатской диссертации М.В. Кожухова на тему «Разработка и исследование моделей радиационных воздействий для расчета характеристик кремниевых и кремний-германиевых биполярных транзисторов с помощью системы TCAD»

АКТ

Комиссия в составе:

председатель - Александр Владимирович Суворинов – главный научный сотрудник ФГБНУ «НИИ ПМТ», д.т.н. и членов комиссии:

- Анна Ивановна Гайдар - старший научный сотрудник ФГБНУ «НИИ ПМТ», к.ф.-м. н.,

- Борис Алексеевич Лапшинов - ведущий научный сотрудник ФГБНУ «НИИ ПМТ», к.т.н.

составила настоящий акт в том, что в период с 2011 по 2015 г.г. при выполнении научно-исследовательских работ учреждений ФГБУ «НИИ МЭИИТ» и ФГБНУ «НИИ ПМТ» были использованы следующие результаты диссертационной работы Кожухова М.В.:

1. Методика пересчета потока протонов в эквивалентный ему по воздействию поток нейтронов и дозы гамма-излучения для построения приборно-технологических моделей для учёта совместного влияние ионизационных и структурных эффектов на основные электрофизические параметры Si и SiGe материалов, таких как время жизни неравновесных носителей заряда, скорости поверхностной рекомбинации, концентрации, что позволило прогнозировать характеристики Si и SiGe биполярных структур, подвергнутых нейтронному, протонному и гамма-излучению.

2. Модели для приборно-технологического проектирования элементов Si и SiGe аналого-цифровых БиКМОП СБИС с учётом воздействия нейтронного, протонного и гамма-излучений, в которые

включены новые более точные по сравнению с ранее используемыми, физические зависимости для структурной и ионизационной составляющей.

3. Унифицированные SPICE-модели Si и SiGe интегральных биполярных транзисторов, изготовленных по современным и перспективным технологиям, которые учитывают совместное влияние стационарного радиационного излучения и эффектов усиления радиационной деградации параметров от влияния «горячих» носителей на их электрические характеристики.

Разработанные приборно-технологические и SPICE модели элементов Si и SiGe аналого-цифровых БиКМОП СБИС, учитывающие радиационное воздействие, использовались при выполнении следующих НИР: «Разработка конструкции и топологии твердотельной интеллектуальной силовой микросхемы на основе комбинированной Би-КМОП-ДМОП технологии» (2011 г., ФГБУ «НИИ МЭИИТ») и НИР «Исследование и разработка радиационных моделей элементов кремний-германиевых аналого-цифровых БиКМОП СБИС для проектирования космической радио-И телекоммуникационной аппаратуры» (2014 г.- 2015г., ФГБУ «НИИ МЭИИТ» и ФГБНУ «НИИ ПМТ»).

Методика пересчета потока протонов использовалась для оценки радиационной стойкости Si и SiGe транзисторов при выполнении ФГБУ «НИИ ПМТ» НИР «Исследование и разработка радиационных моделей элементов кремний-германиевых аналого-цифровых БиКМОП СБИС для проектирования космической радио- и телекоммуникационной аппаратуры» (2015 г.).

Использование моделей ДЛЯ приборно-технологического И схемотехнического моделирования электрических характеристик набора Si БТ и SiGe ГБТ (аналогов технологии IBM – 5HP, 7HP, 8HP, 9T), используемых в интеллектуальной силовой микросхеме для управления электродвигателем и ряде элементов аналоговых и цифровых интегральных схем, дало возможность оценить и выдать рекомендации по уменьшению влияния разброса технологических параметров транзисторов радиационную стойкость схем в диапазоне доз гамма-излучения до 10⁵ рад, потоков нейтронов до 1.10^{12} см⁻², потоков протонов 5.10^{13} см⁻², характерных для космической радио- и телекоммуникационной аппаратуры.

Для справки: в конце 2014 г. ФГБУ «НИИ МЭИИТ» вошел в состав ФГБУ «НИИ ПМТ».

Главный научный сотрудник, д.т.н.

Сорва А.В. Суворинов Лая А.И. Гайдар Лат Б.А. Лапшинов

Старший научный сотрудник, к.ф.-м. н.

Ведущий научный сотрудник, к.т.н.



АКТ

Заместитель главного конструктора

едушев

2015 г.

об использовании результатов диссертационной работы М.В. Кожухова «Разработка и исследование моделей радиационных воздействий для расчета характеристик кремниевых и кремний-германиевых биполярных транзисторов с помощью системы TCAD»

В период с 2013 по 2015 г.г. в работах предприятия по созданию системы ориентации солнечных батарей космического аппарата в рамках составной части опытно-конструкторской работы «Создание системы управления поворотами БС КА» (шифр: «Технолог», ТЗ.ГГК.06-2012), которая подвержена влиянию ионизирующих излучений (электронов и протонов) при анализе радиационной стойкости модуля управления использованы следующие результаты, полученные в диссертации Кожухова М.В.:

1. Схемотехнические модели 5 типов кремниевых (2Т312В, 2Т203Д, 2Т874А, 2Т880Д, 2Т881Д) биполярных транзисторов, сборок биполярных транзисторов (1НТ251А, 2ТС622А, 198НТ1БТ1ВК), операционных усилителей (1401УД2А, 140УД601А) используемых в блоке электроники системы ориентации солнечных батарей на космических аппаратах, позволяющие учитывать электронное и протонное излучения.

06345

2. Методики экстракции радиационно-зависящих параметров схемотехнических моделей кремниевых биполярных транзисторов из результатов измерения их электрических характеристик, учитывающие радиационные изменения при воздействии электронного и протонного излучений.

Расчеты, выполненные Кожуховым М.В. с использованием разработанных им схемотехнических моделей, позволили проанализировать радиационную стойкость схем блока управления Р15 (1401УД2А, 140УД601А, 1НТ251А, 2ТС622А, 198НТ1БТ1ВК и др.) при воздействии электронного и протонного излучений с уровнями поглощенной дозы до 1.10⁵ рад и определить пути повышения его радиационной стойкости.

Начальник отдела 18, д.т.н., доцент Начальник лаборатории 58, к.т.н. Начальник лаборатории 188 Ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.

SlobBare A.I B.I B.I H. Albert M.I

А.Б. Захаренко-В.В. ФедоровВ.Т. СеменовИ.П. Безродных