

На правах рукописи



ВЕНЕДИКТОВ МАКСИМ МИХАЙЛОВИЧ

**МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ,
ПОДВЕРГАЮЩИХСЯ НЕЙТРОННОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ**

05.11.13 - Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Нижний Новгород, 2018 г.

Работа выполнена в филиале Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»

Научные руководитель: **Оболенский Сергей Владимирович**
доктор технических наук, профессор кафедры
электроники и квантовой радиофизики
радиофизического факультета ННГУ
им. Н.И. Лобачевского

Официальные оппоненты: **Орлов Лев Константинович**
доктор физико-математических наук,
научный сотрудник отдела физики полупроводников
ИФМ РАН

Беляков Александр Владимирович
кандидат физико-математических наук,
ведущий инженер программист
ООО «МФИ СОФТ»

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие
«Всероссийский научно – исследовательский институт
автоматики имени Н.Л. Духова»

Защита состоится 12 декабря 2018 года в 13.00 на заседании диссертационного совета Д212.165.01 в Нижегородском государственном техническом университете имени Р. Е. Алексеева по адресу: 603155, ул. Минина, 24, Нижний Новгород, Нижегородская обл., корпус 5.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного технического университета имени Р. Е. Алексеева и на сайте по адресу:
https://www.nntu.ru/frontend/web/ngtu/files/org_structura/instit_fakul_kaf_shkoly/fsvk/dissertacii/2018/venediktov_m_m.pdf

Автореферат разослан « ____ » _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.165.01,
доктор технических наук



Белов Ю.Г.

Актуальность темы

Электронная компонентная база, разработанная для использования в аппаратуре военного и космического применения, должна обладать стойкостью к воздействию различных видов радиации [Л1-Л6]. Разработчики аппаратуры нуждаются в методах контроля и обработки информации о характере поведения электронных компонентов до, в момент и после воздействия радиации. Такие методы контроля и обработки экспериментальных данных позволяют обоснованно реализовывать при проектировании аппаратуры программные и схемотехнические решения с целью повышения радиационной стойкости, ограничивающие ток или отключающие питание проблемных полупроводниковых приборов и ИС на время действия различных видов радиации и другие решения, позволяющие повысить уровень стойкости радиотехнической аппаратуры в целом.

Разработанность

В последние годы проблеме разработки новых методов контроля поведения полупроводниковых приборов, подвергающихся нейтронному облучению и совершенствования имеющихся методов уделяется повышенное внимание. Работы Таперо К.И., Громова Д.В., Никифорова А.Ю., Скоробогатова П.К., Стриханова М.Н., Тельца В.А., Чумакова А.И., Елесина В.В и др. в значительной степени освещают проблемы контроля и прогнозирования поведения электрорадиоизделий в условиях радиационного воздействия. В этих работах отражен характер взаимодействия полупроводникового материала с быстрыми нейтронами и тяжёлыми заряженными частицами. В работах Оболенского С.В., Пузанова А.С., Волковой Е.В., Демариной Н.В., Тарасовой Е.А с применением физико-топологического моделирования показаны подходы, используемые для получения информации о параметрах полупроводникового прибора, подвергающегося радиационному воздействию.

Однако в работах этих ученых не рассматриваются:

1. Эффект изменения параметров полупроводниковых приборов после нейтронного воздействия не только в сторону ухудшения, но и в сторону улучшения за счёт повышенной (до облучения) концентрации активных доноров в канале прибора, а также подходы к контролю параметров полевых транзисторов, с возможностью их последующей разбраковки, с использованием физико – топологического моделирования.

2. Способы контроля изменения коэффициента шума GaAs СВЧ полевых транзисторов Шоттки в момент нейтронного воздействия с использованием физико – топологического моделирования.

3. Сбои при нейтронном облучении, процедура определения минимального значения флюенса нейтронов, достаточного для генерации сбоев, а также способы контроля токов затвора и стока полевых нанотранзисторов с длиной канала 30-300 нм в момент нейтронного облучения, с использованием физико – топологического моделирования.

Значительный интерес представляет исследование GaAs СВЧ полевых транзисторов с затвором Шоттки, которые широко применяются в радиоэлектронной аппаратуре [Л7-Л11, Л14]. Следует отметить, что основным поражающим специальным фактором для GaAs СВЧ полевых транзисторов с затвором Шоттки является нейтронное излучение (1...14 МэВ). Указанное выше, обусловило выбор трех направлений исследований, проведенных в диссертации в области контроля: 1) параметров полевых СВЧ транзисторов Шоттки до и после нейтронного воздействия [А1, А2, А4, А5]; 2) коэффициента шума полевых СВЧ транзисторов Шоттки в момент нейтронного воздействия [А4]; 3) сечения сбоев интегральных схем при стационарном нейтронном воздействии в области малых значений энергий частиц [А3, А6, А7].

Работы по первому направлению проводились с целью определения возможности: 1) улучшения параметров GaAs СВЧ транзисторов после нейтронного воздействия; 2) сокращения объема выборки транзисторов для испытаний; 3) разбраковки всей партии на основе результатов обработки экспериментальных данных малой выборки образцов.

Второе направление работ было обусловлено проблемами, связанными с определением коэффициента шума СВЧ полевых транзисторов в момент и непосредственно после воздействия импульса нейтронного излучения. В случае невозможности проведения измерений коэффициента шума из-за больших потерь в сигнальных линиях (20 метров и более), использующихся при испытаниях на моделирующих установках, нормативная документация предписывает контролировать указанный параметр до и после воздействия нейтронов. Но для разработчиков аппаратуры этого недостаточно. Зачастую бывает необходимо реализовать определенный «запас» по критическим параметрам устройства, содержащего СВЧ полевые транзисторы Шоттки, в момент нейтронного облучения, так чтобы выполнить

условия технического задания. Поэтому, необходим расчетно-экспериментальный метод контроля коэффициента шума транзисторов в момент нейтронного облучения.

Актуальность третьего направления исследований обусловлена имеющимися литературными данными [Л10] о том, что у интегральных схем зарубежных изготовителей при уменьшении топологических норм изготовления от субмикронных (0,35 мкм) к нанометровым (60 нм и менее) наблюдается увеличение интенсивности сбоев от нейтронного облучения, а также при воздействии тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ). Причём, при малых энергиях ТЗЧ экспериментальная регистрация сбоев является серьёзной проблемой, так что затруднено определение сечения сбоя и минимального потока частиц, вызывающего сбой. Следовательно, очевидна необходимость контроля вероятности сбоев как GaAs, так и Si интегральных схем на основе анализа величины критического заряда электронов и дырок, возникающих при воздействии ТЗЧ и нейтронов в активной области GaAs и Si полевых транзисторов.

Цель диссертационной работы

Разработка и практическое применение новых методов контроля физических процессов в полевых СВЧ транзисторах Шоттки, подвергающихся стационарному и импульсному нейтронному воздействию, с учётом процессов ионизации полупроводниковой структуры.

Задачи диссертационной работы

В диссертации решаются следующие задачи:

1. Разработка расчетно-экспериментальных методов контроля параметров полевых СВЧ транзисторов Шоттки до и после нейтронного воздействия, контроля коэффициента шума полевых СВЧ транзисторов Шоттки в момент нейтронного воздействия, контроля сечения сбоев интегральных схем при стационарном нейтронном воздействии в области малых значений энергий частиц.

2. Исследование поведения GaAs СВЧ полевых транзисторов Шоттки до, в момент и после воздействия нейтронного излучения.

Методы исследования

В основе всех методов контроля, разработанных в диссертации, лежит комплексный подход с использованием физико – топологического моделирования с применением аналитической и численной моделей. Инструментами теоретических исследований являются математическая статистика и анализ, методы радиационной физики полупроводниковых приборов. Экспериментальная часть работы была

выполнена на базе РФЯЦ ВНИИЭФ и РФЯЦ ВНИИТФ на ядерных реакторах, генерирующих импульсное и непрерывное нейтронное излучение, а также в АО «НПП Салют» на анализаторах Agilent с конвекторами. Привлекалась информация, полученная на ускорителях ТЗЧ.

Научная новизна

1. Предложен расчетно-экспериментальный метод контроля влияния нейтронного облучения на статические и ВЧ параметры GaAs полевых транзисторов Шоттки с использованием комплекса из аналитической и численной физико - топологических моделей. Экспериментально зарегистрировано увеличение коэффициента усиления и уменьшение коэффициента шума полевых транзисторов после нейтронного облучения для транзисторов с повышенной (до облучения) концентрацией активных доноров в канале прибора.

2. Предложен расчетно-экспериментальный метод контроля коэффициента шума GaAs СВЧ полевых транзисторов Шоттки в момент нейтронного воздействия с использованием комплекса из аналитической и численной физико - топологических моделей. Получены зависимости коэффициента шума от времени в момент импульсного нейтронного облучения с учетом процессов ионизации при образовании кластеров радиационных дефектов.

3. Предложен расчетно-экспериментальный метод контроля токов затвора и стока полевых нанотранзисторов с длиной канала 30-300 нм в момент нейтронного облучения, с использованием комплекса из аналитической и численной физико - топологических моделей. Определены пороги сбоев интегральных схем при стационарном нейтронном облучении в области малых значений линейных потерь энергии атомов отдачи.

Практическая значимость

Достигнут технический эффект, заключающийся в определении: 1) особенностей поведения полевых СВЧ транзисторов в момент и после нейтронного облучения; 2) статистических характеристик распределения параметров облученных изделий в партии. Предложен подход к разбраковке партии транзисторов и интегральных схем по уровню радиационной стойкости на основе экспериментальных данных статистически значимой выборки образцов.

Данная информация позволяет повысить эффективность разработки, изготовления и применения полевых транзисторов и интегральных схем. Экономический эффект заключается в уменьшении объема исследований и испытаний на этапе макетирования

при разработке, сокращения количества итераций схемотехнической реализации радиационнстойкой аппаратуры.

Практическое использование

Предложенные в работе методы контроля были успешно использованы при выполнении опытно – конструкторских работ (ОКР «Веер», ОКР «Пирит») в филиале РФЯЦ ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седякова» для параметрического мониторинга и обработки экспериментальных данных (акт внедрения результатов диссертации № 195-95-29-2920-181).

Обоснованность и достоверность результатов работы

Обоснованность и достоверность результатов работы доказывается:

- применением современной, аттестованной и поверенной измерительной аппаратуры, оснастки и специальных экспериментальных методов исследования;
- применением современных методов теоретического анализа и вычислительных методик моделирования физических процессов в полупроводниковых приборах;
- апробацией предложенных физико – математических моделей, экспериментальных подходов и методов обработки экспериментальных данных на международных, всероссийских и региональных конференциях.

Апробация работы

Материалы по теме диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и региональных конференциях:

- Международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии», Н.Новгород, ИСТ, СЕКЦИЯ 1 Радиотехнические системы и устройства, 2014г.;
- 20-я научная конференция по радиофизике, Н.Новгород, ННГУ им. Н.И.Лобачевского, Радиофизический факультет, Секция «Электроника», 2016г.
- 19-я Всероссийская научно - техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» ФГУП «НИИП», Московская обл., г. Лыткарино, 2016г.
- Международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии», Н.Новгород, ИСТ, СЕКЦИЯ 1 Радиотехнические системы, 2016г.
- Международная конференция «Нанофизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 2018г.

Личный вклад автора

Вклад автора при разработке методов контроля является определяющим с точки зрения постановки задачи, проведения расчетов и анализа полученных результатов. Основные результаты по анализу и разработке расчётно - экспериментальных методов контроля и оценки параметрических изменений критериальных параметров полевых транзисторов при нейтронном воздействии получены автором лично или при его непосредственном участии.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 14 работ, из них 4 статьи в журналах, входящих в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук». Получено 2 патента на изобретения.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 135 страниц, включая 38 рисунков, 17 таблиц и список цитируемой литературы из 120 наименований.

Положения, выносимые на защиту

1. Расчётно-экспериментальный метод контроля параметров полевых СВЧ транзисторов Шоттки, позволяющий прогнозировать увеличение их коэффициента усиления и снижение коэффициента шума после воздействия нейтронного излучения.

2. Расчётно-экспериментальный метод контроля, позволяющий определить коэффициент шума GaAs полевых СВЧ транзисторов Шоттки в момент воздействия нейтронного излучения.

3. Расчётно-экспериментальный метод контроля, позволяющий определить минимальное значение потока нейтронов, необходимого для возникновения сбоя интегральных схем в области малых линейных потерь энергии атомов отдачи.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении – показана актуальность, разработанность темы, определены цели и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость полученных результатов.

В первой главе обсуждаются физические эффекты при воздействии нейтронного облучения на GaAs и Si полевые транзисторы [Л1 – Л5, Л14]. На рис. 1.1 представлена характерная структура каскадов смещений (кластера дефектов) в GaAs, а на рис. 1.2

показана модель Госсика, описывающая возникновение потенциального барьера для носителей заряда вокруг кластера дефектов. На основании расчетов по модели Госсика оценены размеры объёмного пространственного заряда (ОПЗ) субкластера, а также расстояние между субкластерами, через которое горячие электроны могут проникать «сквозь» кластер.

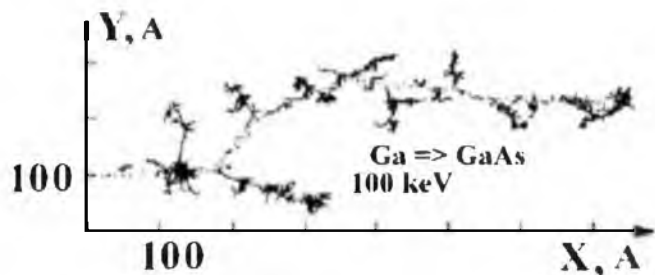


Рис. 1.1 Характерный вид кластера, возникшего при движении атома Ga (100 кэВ) в GaAs. Захват электронов на ловушки, связанные с радиационными дефектами, приводит к возникновению заряженной оболочки вокруг кластера, как это показано на рис. 1.2.

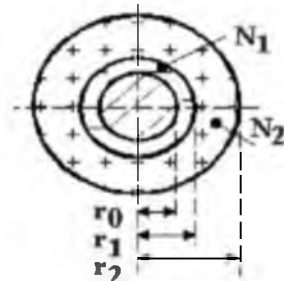


Рис. 1.2 Структура кластера радиационных дефектов в полупроводнике n-типа (модель Госсика [Л15]): радиус внутреннего ядра – r_0 ; радиус поврежденной области – r_1 ; радиус области пространственного заряда – r_2 ; концентрация заряженных радиационных дефектов – N_1 ; концентрация ионов доноров – N_2 .

Кроме того, в главе 1 говорится о том, что существует необходимость в прогнозировании поведения полевых транзисторов после облучения и необходим метод контроля параметров при нестандартном поведении транзисторов, а именно, при увеличении коэффициента усиления и уменьшения коэффициента шума после нейтронного воздействия, позволяющий проводить отбраковку потенциально ненадёжных образцов. Этому посвящена вторая глава. Также показано, что основным параметром малошумящих СВЧ-полевых транзисторов является коэффициент шума, который наряду с коэффициентом усиления, током насыщения и другими параметрами определяет возможности применения полевого транзистора в радиоэлектронной аппаратуре [Л1 – Л4]. Однако, в силу особенностей методики измерения коэффициента шума в СВЧ-диапазоне требуется специальная аппаратура, что не позволяет проводить измерения коэффициента шума в момент импульсного воздействия радиации [Л14]. Традиционный контроль коэффициента шума до и после воздействия импульсного гамма-нейтронного облучения не позволяет определять уровень бесшумной работы транзисторов в момент облучения. В связи с этим необходима разработка расчётно-экспериментального метода контроля коэффициента шума в момент воздействия радиации. В качестве опорных экспериментальных данных в работе предлагается

использовать измеренную зависимость коэффициента усиления от времени в момент и после облучения. Кроме аналитической взаимосвязи коэффициентов усиления и шума, предложено использовать численную физико-топологическую модель транспорта электронов для уточнения и детализации параметров физического процесса и выработки рекомендаций разработчикам аппаратуры. Этому посвящена третья глава диссертации.

Традиционными способами обработки результатов исследований одиночных сбоев полупроводниковых приборов является использование функции Вейбулла и критериев, определяющих вероятность сбоя на её основе. В связи с тем, что точная аппроксимация закона распределения функцией Вейбулла невозможна по причине недостатка информации о минимальном сечении сбоев ИС для малых значений энергии частиц, такие способы не дают гарантированного определения уровня бессбойной работы. Поэтому в данной работе предлагается использовать комбинацию из наиболее часто применяемых критериев с целью повышения достоверности определения уровня бессбойной работы. Для того, чтобы использовать известные подходы к расчетам сечения сбоев при нейтронном облучении разработан комплекс из аналитической и численной физико-топологических моделей и предложен метод контроля сечения сбоев КНИ КМОП и GaAs СВЧ интегральных схем при нейтронном облучении. Это показано в четвертой главе диссертации.

В главе 1 также рассмотрены аналитические и численные физико-топологические модели полевых транзисторов, а также методы моделирования процессов транспорта электронов в канале полевых транзисторов и определения их статических и ВЧ параметров с учетом радиационного воздействия [Л6]. Основными уравнениями, определяющими транспорт носителей заряда, являются: уравнения Пуассона, непрерывности, баланса энергии и импульса носителей заряда, а также выражения для плотности тока и потока энергии электронов [Л14].

$$\Delta V = \frac{q}{\varepsilon_s} (n(F_n) - N_+(F_n) + N_-(F_n)); \quad \frac{\partial n(F_n)}{\partial t} = \frac{1}{q} (\nabla, \vec{j}) + G - R ;$$

$$\vec{j}_n = -qn\vec{v}(F_n) + q\nabla(D(F_n)n(F_n)); \quad \vec{j}_t = \vec{j} + \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}; \quad \vec{E} = -\nabla V; \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial (Wn(F_n))}{\partial t} = (\nabla, \vec{j}_w) + (\vec{j}, \vec{E}) + GW_e - \frac{n(F_n)(W - W_0)}{\tau_w(F_n)};$$

$$\vec{j}_w = -n(F_n)W\vec{v}(F_n) + \nabla(D(F_n)n(F_n)W); \quad \frac{dm(W)\vec{v}(F_n)}{dt} = -q\vec{E} - \frac{m(W)}{\tau_p(F_n)}\vec{v}(F_n)$$

где V – потенциал; n – концентрация электронов; N^+ , N^- – концентрации положительно и отрицательно заряженных ионов (доноров, акцепторов, радиационных дефектов); j , j_t – плотность электронного и полного тока; j_w – плотность потока энергии электронов; W , W_0 – неравновесная и равновесная энергия электрона соответственно; τ_w – время релаксации энергии; τ_r – время релаксации импульса; m – эффективная масса электрона; D – коэффициент диффузии электронов; v – дрейфовая скорость электронов; E – напряженность электрического поля; ϵ_s – диэлектрическая проницаемость; F_n – флюенс нейтронов; q – абсолютная величина заряда электрона; m – эффективная масса электронов; G – коэффициент генерации носителей заряда при воздействии излучения (учитывается только в момент действия ИИ); R – коэффициент рекомбинации (для униполярных приборов учитывается в момент и непосредственно после действия ИИ); W_e – средняя энергия генерируемого электрона (учитывается только в момент действия ИИ).

Благодаря использованию двумерной численной физико-топологической модели, основанной на уравнениях Пуассона и непрерывности, а также выражениях для плотностей диффузионного и дрейфового токов (1.1) осуществлена процедура контроля параметров полевых транзисторов. Общий подход к проведению контроля состоит в проведении двух видов исследований (см. рис.1.3):

1) Измерение параметров у всей партии транзисторов до нейтронного воздействия. Выделение из всей партии небольшой выборки образцов, определяемой методом, который обсуждается во 2 главе диссертации. Проведение облучения данной выборки. Затем, измерение той группы параметров образцов выборки, которую возможно измерить в момент и после нейтронного облучения.

2) Моделирование физических процессов транспорта электронов в структурах полевых транзисторов с учетом нейтронного облучения и расчете полного набора параметров транзисторов. На этом этапе возможно использование аналитических моделей, позволяющих провести ряд расчетов более оперативно, причем повышение точности подобных вычислений возможно при использовании поправочных коэффициентов, получаемых из численной модели (см. 3 главу диссертации).

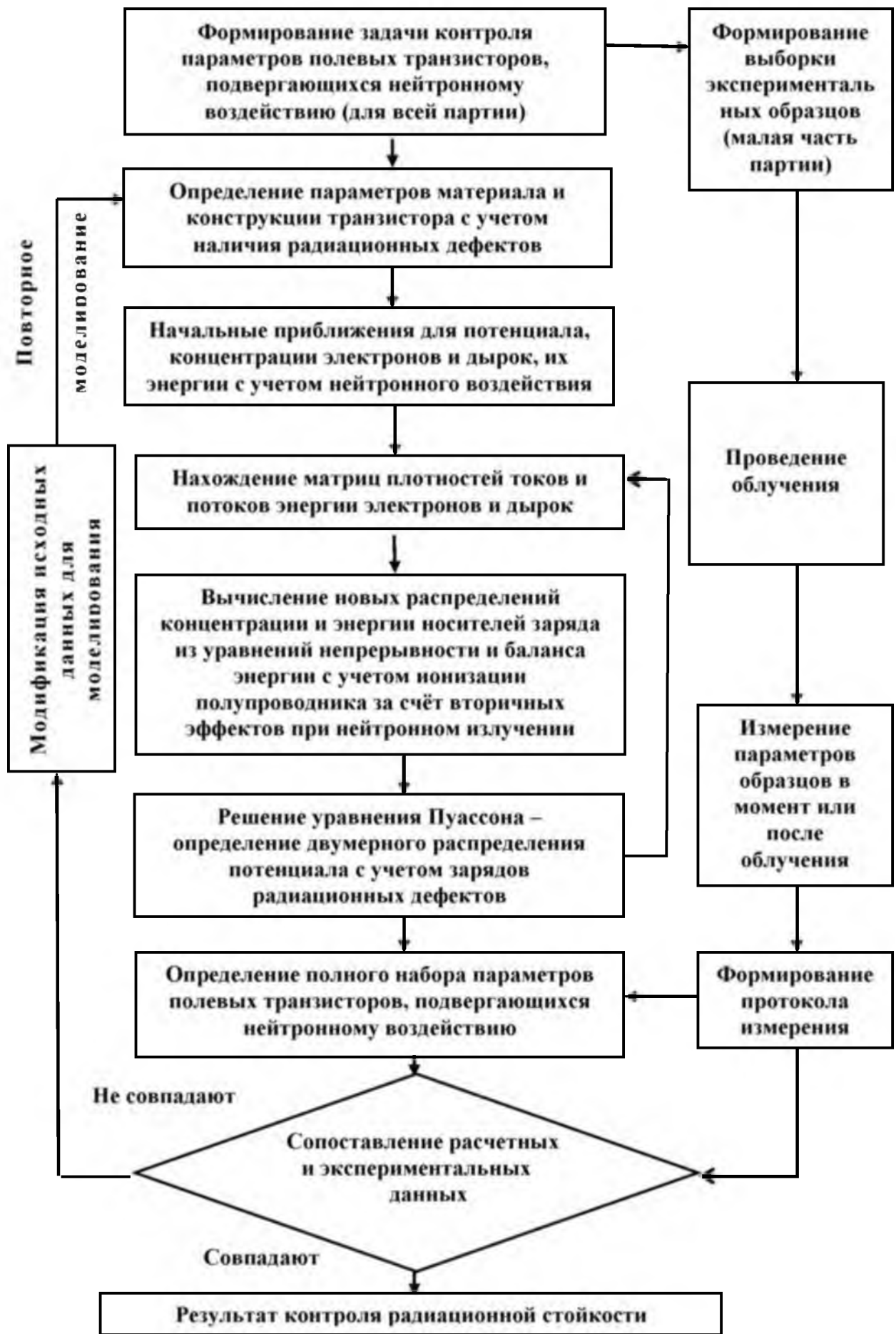


Рис. 1.3 Блок-схема разработанных методов контроля.

Во второй главе на примере воздействия нейтронного облучения на GaAs СВЧ полевые транзисторы с затвором Шоттки предложен расчетно-экспериментальный метод контроля изменений коэффициентов усиления и шума транзисторов на основе комплекса из численной и аналитической физико-топологических моделей.

Для обработки результатов расчетов и экспериментов кроме стандартных методов применялся подход, предложенный в [Л13] и развитый в [А5] для анализа выборки экспериментально измеренных параметров полупроводниковых приборов.

Впервые выявлены изменения коэффициентов усиления и шума после нейтронного воздействия в сторону улучшения исходных значений (см. рис.2.1), т.е. увеличения коэффициента усиления и снижения коэффициента шума транзисторов. Теоретически и экспериментально было показано, что отклонение конструктивных параметров полевых транзисторов (толщины и уровня легирования канала, а также длины затвора) от оптимума до облучения может приводить к повышению коэффициента усиления и снижению коэффициента шума после нейтронного облучения, за счет изменения концентрации активных доноров в канале до оптимального значения.

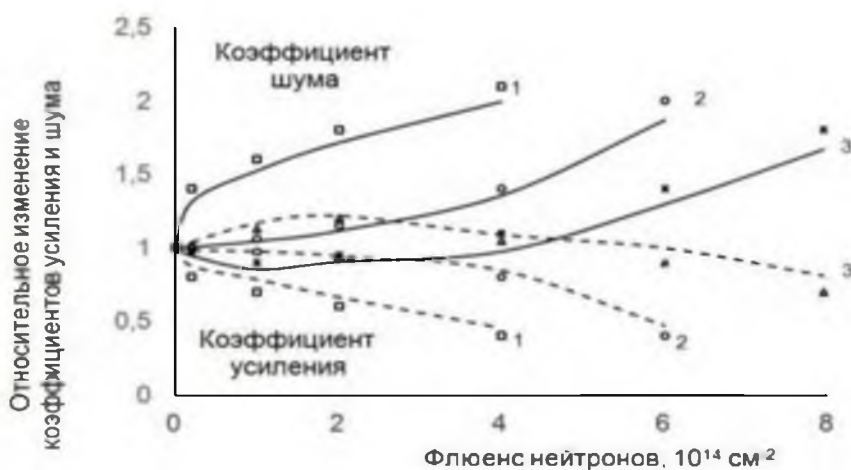


Рис 2.1. Зависимость коэффициентов усиления и шума от уровня нейтронного облучения для трех ПТШ из выбранных групп образцов. Номера 1, 2 и 3 указаны номера групп образцов, по-разному реагирующих на нейтронное облучение

Предложенным методом было обработано 3 партии образцов полевых транзисторов Шоттки различных конструкций по 15 шт. каждая, что позволило провести отбраковку потенциально ненадёжных образцов, исключить проведение повторных дорогостоящих испытаний и поставку ненадёжных транзисторов заказчику. Таким образом, во второй главе:

1. Впервые зарегистрировано статистически значимое *увеличение* коэффициентов усиления и снижение коэффициентов шума полевых транзисторов при нейтронном облучении. Для описания особенностей указанного эффекта предложен расчётно – экспериментальный метод контроля, позволяющий провести расчет параметров транзисторов как до, так и после радиационного облучения. Показано, что

предложенный метод позволяет адекватно контролировать и описывать результаты экспериментов, а также объяснить наблюдаемое улучшение параметров транзисторов после облучения.

2. Описанный эффект изменения (подгонки) коэффициентов усиления и шума транзисторов может быть использован в качестве технологической операции как улучшающей параметры полупроводниковых приборов, так и позволяющий выявить (отбраковать) потенциально ненадежные образцы полупроводниковых приборов.

В третьей главе рассмотрен расчетно-экспериментальный метод контроля коэффициента шума малошумящих GaAs СВЧ полевых транзисторов Шоттки в момент нейтронного облучения (~ 1 МэВ) на основе связи физических процессов, определяющих коэффициенты усиления и шума как аналитически, так и с использованием физико – топологического моделирования. Проблема состоит в том, что на частотах выше 12 ГГц коэффициент шума невозможно измерить на сигнальных линиях длиной около 25 метров. Напротив, коэффициент усиления транзисторов может быть измерен с погрешностью около 0.1 дБ в указанных условиях. Так как коэффициент усиления транзисторов пропорционален отношению крутизны ВАХ транзистора к емкости его затвора, а коэффициент шума пропорционален обратной величине, то возможен пересчет зависимости коэффициента усиления от времени в коэффициент шума от времени.

В связи с этим, в диссертации предложен оригинальный подход к проведению *физико-топологического моделирования* транспорта электронов в полупроводниковых структурах полевых транзисторов в момент нейтронного облучения, который основан на калибровке результатов расчетов по экспериментальным значениям коэффициента шума до и после облучения, а также результатам измерения коэффициента усиления до, в момент и после импульсного (~ 1 мс) нейтронного воздействия.

Для аналитической обработки экспериментальных данных использовалось соотношение: $K_{шобл} = \delta \cdot \lg \left(K_{шдо} \cdot \left(\frac{K_{рдо}}{K_{робл}} \right) \right)$, где $K_{шобл}$ - коэффициент шума после облучения, а $K_{шдо}$ - коэффициент шума до облучения; $K_{рдо}$ и $K_{робл}$ – коэффициенты усиления до и после облучения соответственно, δ – поправочный коэффициент, получаемый на основании данных о значении коэффициента шума после облучения, измеренного в лабораторных условиях. Коэффициенты усиления определялись как: $K_{рдо} = \frac{P_{2до}}{P_{1до}}$, $K_{робл} = \frac{P_{2обл}}{P_{1обл}}$, где $P_{2до}$ и $P_{1до}$ мощности (мВт) выходного и входного сигналов модулей до облучения, а $P_{2обл}$ и $P_{1обл}$ мощности (мВт) выходного и входного

сигналов модулей после облучения. Результаты сопоставления расчетов по аналитической и численной физико-топологическим моделям приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 Сопоставление результатов экспериментов и расчетов с помощью физико-топологических моделей с использованием опорных экспериментальных данных по коэффициенту усиления.

Вид определения коэффициента шума	Коэффициенты усиления и шума, дБ				
	До облучения	Спустя 100 мкс после начала импульса	Спустя 1 мс после начала импульса	Спустя 10 мс после начала импульса	Спустя 1 месяц после импульса
Определение коэффициента шума аналитическим методом	1.42	5.6	3.4	2.52	2.16/11%
Определение коэффициента шума численным методом	1.43	6.7	3.2	2.41	2.07/7%
Измерения коэффициента усиления в ходе исследований на импульсном реакторе	8.5	2.9	5.2	6.5	7.1
Измерения коэффициента шума в лабораторных условиях	1.41 ±17%	-	-	-	1.92 ±26%

Для моделирования процессов в транзисторах до, в момент и после нейтронного воздействия использовалась двумерная численная физико-топологическая модель, основанная на квазигидродинамическом приближении. Решалась система уравнений (1.1). В отличие от [Л6] впервые в данной работе нейтронное воздействие учитывалось не только путем изменения концентрации активных доноров и акцепторов, подвижности электронов и дырок, но также учитывалась ионизация полупроводника за счет сопутствующего гамма-облучения и вторичных процессов дефектообразования. Дефектообразование и ионизация полупроводниковых структур транзисторов моделировалось с помощью алгоритма TRIM [Л12]. Система уравнений решалась численно, стандартными разностными методами с использованием прямоугольной расчетной сетки. Результаты сопоставления аналитических и численных расчетов приведены в таблице 3.1. Таким образом, в третьей главе:

1. Предложен расчетно-экспериментальный метод контроля коэффициента шума СВЧ полевых транзисторов Шоттки в момент импульсного нейтронного облучения, учитывающий процессы дефектообразования и ионизации полупроводника, существенно влияющие на параметры транзисторов при облучении. Применение метода позволяет проводить конструирование транзисторов с повышенным уровнем радиационной стойкости.

2. Использование физико-топологической модели полупроводникового прибора позволяет контролировать физические процессы транспорта электронов в полупроводниковой структуре, приводящие к изменению коэффициента шума в момент нейтронного воздействия и дает возможность проводить оптимизацию параметров транзисторов с учетом указанных процессов.

В четвёртой главе рассмотрены процессы ионизации арсенида галлия и кремния при образовании кластеров радиационных дефектов в условиях стационарного нейтронного облучения, которые могут приводить к сбою функционирования интегральных схем (ИС). Обычно проведение испытаний ИС на воздействие тяжелых заряженных частиц проводится на ускорителях частиц с энергиями 20...300 МэВ. При воздействии таких частиц вероятность сбоев ИС статистически значима, что позволяет провести эксперимент в ограниченные временные сроки. Однако разработчики космической аппаратуры заинтересованы в расширении спектра информации о сбоеустойчивости ИС как при воздействии тяжелых заряженных частиц, так и нейтронов во всем диапазоне энергий, реализующихся в космическом пространстве, в том числе и в диапазоне от 1 до 20 МэВ.

В диссертации показано, что в некоторых конструкциях современных ИС из-за уменьшения размеров активных областей транзисторов и площадей их затворов критический заряд электронов и дырок, собираемых при ионизации полупроводника в момент формирования кластера радиационных дефектов, может существенно уменьшаться. Поэтому возможно возникновение сбоев при нейтронном облучении, чего ранее, для ИС, изготовленных по технологии с топологическими нормами более 0.5 мкм не наблюдалось. На основе физико-топологического моделирования предложен обобщенный подход к анализу нестационарных зависимостей токов стока и затвора транзисторов и определению критического заряда, генерируемого в полевых транзисторах, облучаемых ТЗЧ и нейтронами, который позволяет оценить сечение сбоев ИС при уменьшении топологических норм изготовления.

Анализ литературы показал, что облучение тяжелыми заряженными частицами с энергиями ~ 1 МэВ теоретически может приводить к сбоям ИС, но из-за малого сечения указанного события на практике регистрация таких эффектов на ускорителях частиц затруднительна. Использование источников нейтронного излучения (ядерных реакторов) позволяет исследовать указанные процессы, а предложенный в работе расчетно-экспериментальный метод контроля сечения сбоев интегральных схем позволяет сопоставлять результаты исследований для GaAs СВЧ и цифровых Si ИС как для нейтронного облучения, так и при воздействии ТЗЧ.

В результате проделанной работы согласно [Аб], технический результат достигается тем, что в данном методе определяют минимальное значение потока частиц, приводящего к сбою в области малых значений линейных потерь энергии частиц с

использованием семи критериев (выбирают минимальное значение потока частиц - наихудший случай). С целью апробации метода контроля при проведении анализа трех типов образцов (БМК, АЦП, СОЗУ) было выяснено, что для ИС первого типа минимальное значение потока частиц, приводящее к сбою, следует определять по критерию 5; для ИС второго и третьего типов - по критерию 1 (см. таблицу 4.1).

Таблица 4.1 - Результаты сравнения минимальных значений потоков частиц F_{min} для всех рассмотренных критериев равенства для ИМС №№1, 2 и 3.

№ИМС	Критерий						
	1	2	3*	4	5	6	7
	Fi, частиц						
1	$6,6 \cdot 10^3$	∞	-	$6 \cdot 10^4$	$6,5 \cdot 10^3$	$8,3 \cdot 10^3$	$6,7 \cdot 10^3$
2	$3,6 \cdot 10^2$	$2,0 \cdot 10^4$	-	$1,8 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^3$	$4,0 \cdot 10^3$	$4,0 \cdot 10^3$
3	$6,3 \cdot 10^6$	$2,6 \cdot 10^9$	-	$3,1 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^7$	$3,0 \cdot 10^7$	$3,3 \cdot 10^8$

Примечание: * Третий критерий для таких исходных данных не применим, т.к. интенсивность потока выше, максимальной интенсивности, которую имеет смысл оценивать

Таким образом, предложенный метод контроля сечения сбоев эффективен и может прогнозировать уровень стойкости ИС к эффектам сбоев от воздействия тяжелых заряженных частиц. Данным запатентованным методом [А6] были теоретически определены значения поперечного сечения сбоев от линейных потерь энергии частиц, а также минимального значения флюенса частиц, приводящего к сбою, более чем у 100 образцов из разных партий, проведена отбраковка потенциально ненадежных ИС на этапе макетирования и последующего изготовления, что позволило повысить качество ИС, сократить время их изготовления (избежать повторных испытаний).

Таким образом, в четвертой главе:

1. Предложен расчетно-экспериментальный метод контроля сечения сбоев интегральных схем при стационарном нейтронном воздействии в области малых значений энергий частиц с использованием комплекса из численной и аналитической физико – топологических моделей. Получен технический результат, состоящий в определении минимального флюенса частиц, достаточного для генерации сбоев.

2. Предложен аналитический подход и рассчитана частота сбоев GaAs СВЧ и цифровых Si КНИ КМОП интегральных схем при стационарном нейтронном облучении, который позволяет сопоставлять результаты исследований для интегральных схем, изготовленных из различных материалов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертации - следующие:

1. Разработан расчетно-экспериментальный метод контроля параметров полевых СВЧ транзисторов Шоттки до и после нейтронного воздействия, позволяющий

прогнозировать увеличение коэффициента усиления и снижение коэффициента шума после облучения. Метод основан на применении комплекса численной и аналитической физико – топологических моделей транспорта электронов в полупроводниковых структурах транзисторов. Путем сопоставления расчета и эксперимента обоснована адекватность предложенных математических моделей и метода контроля параметров транзисторов в целом. Показана возможность коррекции (подгонки) коэффициента усиления и шума транзисторов путем их нейтронного облучения, позволяющая выявить (отбраковать) потенциально ненадежные образцы полупроводниковых приборов.

2. Разработан расчетно-экспериментальный метод контроля коэффициента шума полевых СВЧ транзисторов Шоттки в момент нейтронного воздействия на основе физико-топологического моделирования и калибровочных экспериментальных данных о поведении коэффициента усиления в момент воздействия радиации. Теоретически и экспериментально показано, что метод может применяться для определения уровней стойкости СВЧ малошумящих полевых транзисторов в момент и после воздействия импульсного нейтронного облучения на частотах измерительного сигнала 12 ГГц (подтверждено экспериментально) и до 37 ГГц (подтверждено теоретически).

3. На основании физико – топологического и аналитического подходов разработан обобщенный расчетно-экспериментальный метод контроля сечения сбоев интегральных схем при стационарном нейтронном воздействии в области малых значений энергий частиц (1...14 МэВ). Практическим результатом предлагаемого метода контроля стойкости элементов цифровой техники к указанным эффектам сбоев является определение минимального значения флюенса нейтронов, достаточного для генерации единичных сбоев.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Л1. Агаханян, Т.М. Радиационные эффекты в интегральных микросхемах/ Т.М. Агаханян, Е.Р. Аствацатурьян, П.К.Скоробогатов - М: Энергоатомиздат, 1989. - 256 с.

Л2. Громов, Д.В. Теоретический анализ и экспериментальное исследование функционирования сверхвысокочастотных интегральных схем на арсениде галлия при воздействии радиационных и электромагнитных излучений: Дис. док. тех. наук: 05.27.01/ Громов Дмитрий Викторович – М., 2001. – 445 с.

Л3. Аствацатурьян, Е.Р. Радиационные эффекты в приборах и интегральных схемах на арсениде галлия / Е.Р. Аствацатурьян, Д.В. Громов, В.М. Ломако - Минск: Университетское, 1992. - 219 с.

Л4. Вологдин, Э.Н. Радиационные эффекты в интегральных микросхемах и методы испытаний изделий полупроводниковой электроники на радиационную стойкость/

Э.Н. Вологдин, А.П. Лысенко, учебное пособие – М: Московский государственный институт электроники и математики (технический университет), 2002. – 46 с.

Л5. Таперо, К.И. Развитие методов расчётно-экспериментального моделирования радиационных эффектов при проектировании и испытаниях радиационно-стойких изделий электронной техники космического применения: Дис. док. техн. наук: 05.27.01 / Таперо Константин Иванович – Лыткарино, 2017. – 269 с.

Л6. Оболенский, С.В. Предел применимости локально-полевого и квазигидродинамического приближения при расчетно-экспериментальной оценке радиационной стойкости субмикронных полупроводниковых приборов / Оболенский С.В. // Изв. вузов. Электроника. - 2002. - № 6. – С.31-38.

Л7. Боруздина, А.Б. Выявление многократных сбоев в микросхемах СОЗУ от воздействия отдельных заряженных частиц космического пространства /А.Б. Боруздина, А.И. Чумаков, А.В. Уланова, А.Ю. Никифоров, А.Г. Петров // Электроника. - 2012. - № 5. - С.44-48.

Л8. Колотун, О. СВЧ-компоненты фирмы HITITE Microwave Corporation / О. Колотун// Инженерная микроэлектроника. – 2009. - №2. - С44 – 51.

Л9. Елесин, В.В. Расчетно-экспериментальное моделирование СВЧ-характеристик металлокерамических и металлостеклянных корпусов ИС / В.В. Елесин, Г.Н.Назарова, Г.В. Чуков // Электроника. - 2012. - № 5. - С.24-30.

Л10. Стенин, В.Я. Моделирование характеристик КМОП 28-нм ячеек DICE в нестационарных состояниях, вызванных воздействием одиночных ядерных частиц / В.Я. Стенин// Микроэлектроника. - 2015. - №5. - С.368 – 379.

Л11. Метелкин, И.О. Моделирование переходных ионизационных эффектов в полевых транзисторах на арсениде галлия / И.О. Метелкин, Елесин В.В. // Электронная техника. - Серия 2 Полупроводниковые приборы. - 2016. – №2. - С.10-21.

Л12. Biersak, J.P. Computer simulation of sputtering / J.P. Biersak // Nuclear instruments and methods in physic research. - 1987. - No.1. - P.21-36.

Л13. Salvia Anthony, A. The condence region dvuhsvetny / A.Salvia Anthony// A IEEE Transactions on Reliability. – 1981. - No.5. - P.397-400.

Л14. Оболенский, С.В. Физико-топологическое моделирование характеристик субмикронных полевых транзисторов на арсениде галлия с учётом радиационных эффектов: Дис. док. техн. наук: 05.27.01 / Оболенский Сергей Владимирович – М., 2003. - 292с.

Л15. Gossik, B.R. Disordered region in semiconductors bombarded by fast neutron / B.R. Gossik // J.Appl. Phys. - 1954. - No.9. - P. 1214-1218.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

А1. Венедиктов, М.М. Применение метода построения двухсвязной доверительной S-области к исследованию влияния импульсных электромагнитных полей на биполярные транзисторы / М.М. Венедиктов, В.К. Киселев// ВАНТ. - 2015. - №2. - С.5-11

А2. Венедиктов, М.М. Распределение критической мощности при исследовании стойкости к воздействию импульса электрической мощности в биполярных транзисторных структурах / М.М. Венедиктов, В.К. Киселев// ВАНТ. - 2015. - №.2. - С.12-19

А3. Венедиктов, М.М. Оценка стойкости элементов цифровой электроники к эффектам единичных сбоев в области малых значений величин линейной передачи энергии / М.М. Венедиктов, В.К. Киселев// ВАНТ. - 2015. - №.4 – С.28-37.

А4. Венедиктов, М.М. Оценка воздействия ионизирующих излучений на электронные компоненты по результатам испытаний ограниченных выборок / М.М. Венедиктов, Е.С. Оболенская, В.К. Киселев, С.В. Оболенский // Журнал Радиоэлектроники. – 2017. - №1. - С.34.

А5. Способ направленной модификации полупроводниковых приборных структур с использованием импульсных электромагнитных полей: Патент RU 2545077, дата государственной регистрации 18.02.2015г. / Киселёв В.К., Венедиктов М.М.

А6. Способ оценки стойкости элементов цифровой электроники к эффектам сбоев от воздействия единичных частиц: Патент RU 2657327, дата государственной регистрации 13.06.2018г. / Оболенский С.В., Киселев В.К., Венедиктов М.М.

А7. Венедиктов, М.М. Оценка воздействия ионизирующих излучений на электронные компоненты по результатам испытаний ограниченных выборок / М.М. Венедиктов, В.К. Киселев, С.В. Оболенский // 19-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» ФГУП «НИИП». – Лыткарино. – 2016. - С12.