

На правах рукописи

Мешков Сергей Анатольевич

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
И СРЕДСТВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПРИБОРОВ ДЛЯ
НЕЛИНЕЙНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ МИКРОВОЛНОВЫХ
РАДИОСИГНАЛОВ

Специальности
05.11.14 Технология приборостроения
05.12.04 Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук



Москва - 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н. Э. Баумана)

Научный консультант: **Шашурин Василий Дмитриевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологий приборостроения Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана (МГТУ им. Н. Э. Баумана)

Официальные оппоненты: **Кондратенко Владимир Степанович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой оптических и биотехнических систем и технологий Российского технологического университета (МИРЭА)

Пиганов Михаил Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева (Самарский университет)

Савченко Владимир Петрович, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник АО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца»

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Защита диссертации состоится «__» _____ 2021 г. в _____ час. на заседании диссертационного совета Д 212.141.18 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета и выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке МГТУ им. Н. Э. Баумана и на сайте bmstu.ru.

Телефон для справок 8 (499) 267-09-63.

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета Д. 212.141.18
д.т.н., доцент



Михайлов В.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современный этап развития радиоэлектронных средств (РЭС) характеризуется продвижением в микроволновый и более коротковолновые диапазоны, что позволяет улучшить их тактико-технические характеристики и расширить круг решаемых задач.

Ключевую роль в формировании радиотехнических характеристик РЭС играют приборы для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов, как то: приборы для генерации, смешивания, умножения и деления частот, выпрямления, детектирования и других преобразований. Создание новых и совершенствование существующих приборов данного класса (с учетом общих тенденций развития РЭС) в настоящее время осуществляется на основе ряда требований, ключевыми из которых являются повышение эксплуатационных и технологических характеристик изделий. Единственно доступные в ближайшей перспективе в микроволновом диапазоне аналоговые нелинейные преобразования радиосигналов основаны на использовании нелинейного элемента - полупроводникового элемента с нелинейной вольт-амперной характеристикой. Поэтому наряду с совершенствованием известных элементов, например, диодов с барьером Шоттки, необходим поиск новых элементов, конструктивно-технологические характеристики которых откроют новые возможности повышения эксплуатационных и технологических характеристик приборов на их основе.

Одним из путей, направленных на удовлетворение этих требований применительно к приборам данного типа, является создание изделия с использованием резонансно-туннельного диода в качестве нелинейного элемента конструкции. Основные преимущества такого решения по сравнению с применяемыми в настоящее время вариантами следующие:

- конструкция резонансно-туннельного диода дает возможность целенаправленного варьирования формы его вольт-амперной характеристики, что, в свою очередь, открывает возможности варьирования электрических характеристик приборов для удовлетворения более высоких требований к ним. Наличие на вольт-амперной характеристике резонансно-туннельного диода участков как с положительной, так и с отрицательной дифференциальной проводимостью позволяет создавать разнообразные приборы для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов на его основе, а возможность получения симметричной относительно начала координат формы вольт-амперной характеристики позволяет упростить конструкторско-технологическую реализацию приборов;

- предельная рабочая частота приборов на основе резонансно-туннельных диодов составляет единицы ТГц в типичных для технических приложений условиях эксплуатации.

Вместе с тем, несмотря на имеющийся на настоящий момент опыт в создании приборов на данном схемно-конструкторском решении, конструкторское и технологическое проектирование, а также дальнейшее

производство этих приборов характеризуется наличием значительных нерешенных проблем (фундаментальных и прикладных), что не позволяет реализовать в полной мере технические возможности таких приборов и осуществлять успешный запуск изделий в производство. Прежде всего к ним следует отнести:

- высокую трудоемкость конструкторско-технологических мероприятий создания изделия, определяемую, в первую очередь, отсутствием научно-обоснованного подхода к оценке влияния технологии производства прибора на его выходные характеристики. Как следствие, отсутствуют методики (и средства для их реализации), позволяющие комплексно и взаимосвязанно учитывать влияние конструктивных и технологических факторов на формирование электрических характеристик прибора. В настоящее время высокая длительность принятия решений не позволяет осуществлять ускоренную разработку и запуск в производство приоритетных изделий;

- отсутствие методов обеспечения производства изделий с заданными показателями надежности. Это обстоятельство в значительной мере определяет низкую эффективность конструкторско-технологического этапа проектирования изделия, обусловленную необходимостью увеличения объема испытаний на надежность. Технология производства изделия в рамках данной задачи формируется в условия неопределенности при принятии решений;

- отсутствие научно обоснованного подхода к проблеме управления качеством (требуемые электрические параметры, показатели надежности и технологической рациональности) при конструкторско-технологическом проектировании и производстве приборов. Это не позволяет в полной мере использовать возможности конструктора при проектировании прибора и возможности технолога при его изготовлении, что сужает круг возможных конструкторско-технологических решений. Негативным фактором, влияющим на возможность разработки технологически рациональных решений, является отсутствие методов и средств, позволяющих учесть на этапах конструкторско-технологического проектирования влияние разнообразных условий эксплуатации на формирование показателей качества прибора.

Очевидно, что для минимизации трудоемкости и сроков внедрения в производство, а также обеспечения эффективности производства приборов данного класса, обладающих заданными эксплуатационными характеристиками, необходим комплексный подход к их конструкторско-технологическому проектированию. Решение обозначенных проблем требует разработки соответствующей методологии, конструкторско-технологических методов и средств проектирования.

Изложенное позволяет сформулировать **цель диссертационной работы:** создание научно обоснованной методологии, а также конструкторско-технологических методов и средств обеспечения проектирования и производства приборов для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов перспективных РЭС с учетом условий эксплуатации.

Основные решаемые задачи:

1. обоснование методологического подхода к проблеме конструкторско-технологического обеспечения проектирования и производства приборов для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов перспективных РЭС;
2. разработка методических средств конструкторско-технологического проектирования, направленных на обеспечение заданных электрических параметров приборов для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов перспективных РЭС с учетом влияния технологии производства прибора;
3. разработка методов и средств, позволяющих осуществлять проектирование и производство приборов для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов с заданными показателями надежности;
4. разработка метода и средств управления качеством (требуемые электрические параметры, показатели надежности и технологической рациональности) при конструкторско-технологическом проектировании и производстве приборов для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов с учетом условий эксплуатации;
5. разработка инженерных методик обеспечения производства приборов для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов.

Объекты и предмет исследований. Объектами исследований являются приборы для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов. Предметом исследований являются показатели качества приборов, их взаимосвязь и проблемы управления ими конструкторско-технологическими методами.

Научная новизна.

1. Предложен новый подход к конструкторско-технологическому проектированию приборов для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов, основанный на принципе функциональной вариабельности формы вольт-амперной характеристики нелинейного элемента прибора и позволяющий получать изделия с заданными электрическими характеристиками с учетом технологических возможностей производства. Показана эффективность данного принципа при использовании в конструкции прибора резонансно-туннельного диода в качестве нелинейного элемента.
2. Определены закономерности формирования электрических параметров приборов для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов, представленные в виде фазового пространства с траекторией движения, конечным исходом которой является попадание в область их допустимых значений или в область отказов. Структура отображения реализована на последовательном преобразовании: пространство параметров конструкции резонансно-туннельного диода, при которых реализуется физический эффект резонансного туннелирования электронов, с учетом возможностей технологии изготовления – пространство конструкторско-технологических параметров диода, необходимых

для обеспечения требуемых электрических параметров прибора – вольт-амперная характеристика диода - пространство электрических параметров прибора.

3. Предложены обобщенная и частные модели фазовых переходов, позволяющие определять электрические характеристики приборов для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов с учетом их вероятностной меры в зависимости от конструктивных характеристик изделия и технологических условий производства. Детерминированные модели описывают формирование электрических характеристик изделия, а стохастические - их вероятностную меру, связанную с технологическими погрешностями производства.

4. Определено, что доминирующая роль в формировании технологических допусков на электрические параметры приборов для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов принадлежит технологическим погрешностям изготовления резонансно-туннельного диода, что определяет инструментальный подход к управлению качеством при конструкторско-технологическом проектировании и производстве приборов.

5. Обоснована физическая модель формирования отказа приборов для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов, базирующаяся на доминирующей роли постепенных отказов, наступающих в результате диффузионных процессов в резонансно-туннельном диоде, приводящих к изменению формы вольт-амперной характеристики и, как следствие, дрейфу электрических параметров прибора. Для определения численных характеристик диффузионных процессов разработана расчетно-экспериментальная методика с применением технологии инфракрасной спектроскопической эллипсометрии.

6. Разработана математическая модель, позволяющая определять показатели надежности приборов для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов на этапах конструкторско-технологического проектирования и базирующаяся на детерминированных моделях, описывающих закономерности изменения электрических параметров под действием внешних факторов за счёт учета доминирующих механизмов деградации, а также статистических моделях, описывающих их вероятностные характеристики, связанные со случайным варьированием параметров технологии производства и внешних воздействий.

7. Разработан метод обеспечения комплекса показателей качества приборов для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов при конструкторско-технологическом проектировании и производстве, в основе которого лежит теория оптимального синтеза параметров приборов.

8. Разработан алгоритм конструкторско-технологической оптимизации, учитывающий закономерности формирования электрических параметров приборов, состоящий из пяти последовательных этапов: построение функции плотности распределения электрических параметров и расчет показателей безотказности и технологической рациональности стартового варианта конструкции прибора; синтез новых номиналов электрических параметров путем целенаправленного варьирования функции плотности их распределения

относительно заданных ограничений, обеспечивающих требуемые показатели безотказности и технологической рациональности; синтез оптимальной формы ВАХ нелинейного элемента; синтез параметров конструкции прибора; проверка полученного решения.

Новизна и приоритет предложенных в диссертации методик, технических решений и алгоритмов подтверждены двенадцатью патентами на изобретение и четырьмя свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Практическая ценность работы.

Разработаны внедренные в практику конструкторско-технологического проектирования приборов для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов инженерно-методические и программно-алгоритмические средства, позволяющие обеспечить основные показатели качества, а именно:

1. методика и программно-алгоритмические средства обеспечения электрических параметров приборов, исходя из заданных требований в зависимости от конструкторско-технологического решения,
2. методика и программный комплекс, предназначенные для обеспечения заданных показателей надежности приборов на этапе проектирования в зависимости от конструкторско-технологического решения,
3. методика и программно-алгоритмические средства, позволяющие обеспечить комплекс показателей качества, включая электрические параметры, надежность и технологическую рациональность изделий,
4. инженерные методики проектирования, технологические операции изготовления, а также новые конструкторско-технологические решения приборов и резонансно-туннельных диодов, позволяющие обеспечить заданные показатели качества с учетом технологических возможностей производства и условий эксплуатации.

Результаты диссертационного исследования получены в ходе выполнения шести проектов в рамках государственного задания и федеральных целевых программ, а также ряда хозрасчетных НИР, в которых соискатель являлся научным руководителем и ответственным исполнителем.

Внедрение результатов работы. Результаты работы внедрены в НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва, АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга», г. Москва, ООО «Технологии идентификации», г. Москва, а также в учебный процесс подготовки дипломированных специалистов по специальности «Проектирование и технология радиоэлектронных средств», магистров и бакалавров по направлению «Наноинженерия» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Внедрение подтверждается актами, приложенными к диссертации.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Новый подход к конструкторско-технологическому проектированию приборов для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов, основанный на принципе функциональной вариативности формы вольт-амперной характеристики нелинейного элемента прибора и позволяющий

получать изделия с заданными электрическими характеристиками с учетом технологических возможностей производства.

2. Закономерности формирования электрических параметров приборов для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов, представленные в виде фазового пространства с траекторией движения, конечным исходом которой является попадание в область их допустимых значений или в область отказов.

3. Обобщенная и частные модели фазовых переходов, позволяющие определять электрические характеристики приборов для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов с учетом их вероятностной меры в зависимости от конструктивных характеристик изделия и технологических условий производства.

4. Доминирующая роль технологических погрешностей изготовления резонансно-туннельного диода в формировании технологических допусков на электрические параметры приборов для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов, что определяет инструментальный подход к управлению качеством при конструкторско-технологическом проектировании и производстве приборов.

5. Физическая модель формирования отказа приборов для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов, базирующаяся на доминирующей роли постепенных отказов, наступающих в результате диффузионных процессов в резонансно-туннельном диоде, приводящих изменению формы вольт-амперной характеристики и, как следствие, дрейфу электрических параметров прибора.

6. Математическая модель, основанная на физической модели, позволяющая определять показатели надежности приборов на этапах конструкторско-технологического проектирования.

7. Метод обеспечения комплекса показателей качества приборов для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов при конструкторско-технологическом проектировании и производстве, в основе которого лежит теория оптимального синтеза параметров приборов.

8. Алгоритм конструкторско-технологической оптимизации параметров микроволновых приборов, позволяющий обеспечить комплекс показателей качества, включая требуемые электрические параметры, показатели надежности и технологической рациональности.

Степень обоснованности и достоверности научных положений и результатов работы. Обоснованность теоретических положений обусловлена использованием классических методов теории вероятностей, математической статистики, фундаментальных и прикладных положений технологии приборостроения, теории надежности, радиотехники, управления качеством приборов, методов оптимального проектирования приборов, методов теории линейных и нелинейных электрических цепей, электродинамического анализа микроволновых структур, математического моделирования процессов переноса вещества и зарядов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается экспериментальной проверкой с использованием современной высокотехнологичной аппаратуры и подтверждается соответствием результатов математического моделирования экспериментальным данным. Результаты согласуются с современными научными представлениями и данными отечественных и зарубежных научно-технических источников в исследуемой области.

Обоснованность и достоверность результатов работы подтверждаются обсуждением на международных и российских научно-технических конференциях, патентами на изобретение и свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ, а также публикациями в научных изданиях, входящих в перечень ВАК, и изданиях, реферируемых в международных базах Web of Science и Scopus.

Публикации результатов работы. Основные материалы диссертации опубликованы в 102 работах (из них 44 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 12 патентов на изобретение, 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, 38 статей в материалах международных и российских научно-технических конференциях, 3 коллективные монографии), 42 работы из перечисленных опубликованы в научно-технических журналах, входящих в международные базы данных Web of Science и Scopus.

Апробация результатов работы. Вошедшие в диссертацию результаты докладывались и обсуждались на 40 научно-технических конференциях, в частности: Международной мультидисциплинарной НТК «Перспективная элементная база микро- и наноэлектроники с использованием современных достижений теоретической физики» (Москва, 2019); XV Международной НТК «Электронные средства и системы управления» (Томск, 2019); 17-ой – 21-ой, 24-ой – 26-ой, 29-ой Международных НТК «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2008-2011, 2014-2016, 2019); Международных НТК «Автоматизация» (Сочи, 2018, 2019); Международных НТК «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (Севастополь, 2017, 2018, 2019); Международной НТК «Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies 2018» (Воронеж, 2018); IAA SciTech Forum 2018 (Москва, 2018); 7th International Conference on Nanostructures, Nanomaterials and Nanoengineering (Хоккайдо, Япония, 2018); 3rd IAA Conference on Dynamics and Control of Space Systems (Москва, 2017); 5th International Workshop on Computer Science and Engineering: Information Processing and Control Engineering (Москва, 2015); Международных НТК «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (Москва, 2010, 2014, 2015); 12-ой Международной НТК «Современные информационные и электронные технологии» (Одесса, 2012); XXV Международном симпозиуме «Тонкие пленки в электронике» (Москва, 2012); Международной НТК «Системные проблемы надежности, качества, информационно-телекоммуникационных и электронных технологий в

управлении инновационными проектами Инноватика – 2008» (Москва, 2008); Международной НТК «Вопросы инженерной нанотехнологии» (Москва, 2008); Международной НТК «Микроэлектроника и наноинженерия - 2008» (Зеленоград, 2008); Международном симпозиуме «Надежность и качество-2006» (Пенза, 2006); Международном симпозиуме «Образование через науку» (Москва, 2006) и др.

Личный вклад автора. Все основные научные положения, определение цели, постановка задач, выводы и рекомендации, изложенные в диссертации, предложены автором. Технические решения, вытекающие из теоретических результатов работы, предложены автором и разработаны под его руководством. Экспериментальные исследования и численное моделирование проводились под руководством и при участии автора в коллективе сотрудников МГТУ им.Н.Э.Баумана.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка использованных источников и приложения. Объём диссертации составляет 392 страницы, в том числе 314 страниц основного текста. Список использованных источников содержит 303 наименования и приведен на 29 страницах.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи, сформулирована научная новизна и практическая значимость полученных результатов, описана методология и методы исследований, приведены положения, выносимые на защиту. Указаны состав и структура диссертационной работы.

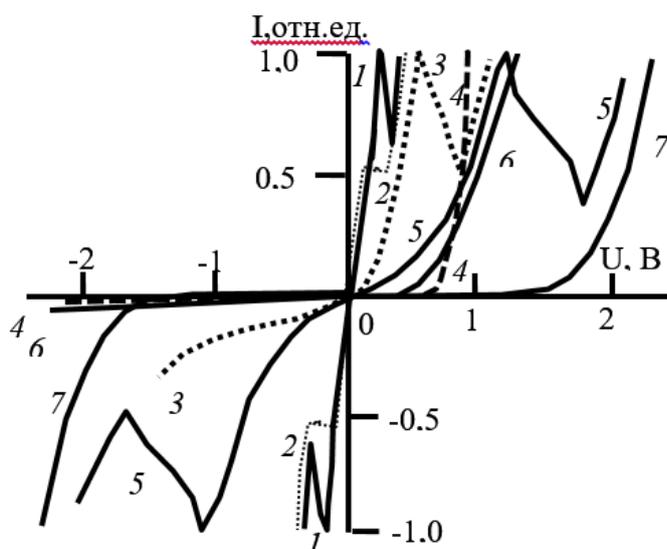
В главе 1 обосновывается методологический подход к проблеме конструкторско-технологического обеспечения проектирования и производства приборов для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов (ПНПМР) перспективных РЭС.

Растущие требования к тактико-техническим характеристикам современных РЭС определяют направления развития ПНПМР, среди которых следует выделить повышение частоты и расширение полосы частот обрабатываемых сигналов, расширение динамического диапазона, снижение уровня нежелательных комбинационных частот в спектре выходного сигнала, повышение эффективности преобразования и др. при ужесточении требований к показателям надежности. Так для авиационного приборостроения необходимы модули с гамма-процентной наработкой $T_{\gamma=0,99} \approx 7-10$ лет, для космической отрасли – 15 и более лет.

Качество нелинейных преобразований радиосигналов определяется, в первую очередь, параметрами нелинейных элементов, такими, как форма вольтамперной (ВАХ) и вольтфарадной (ВФХ) характеристик. Форма ВАХ нелинейного элемента определяется параметрами токопереноса в его структуре и для традиционных элементов, как правило, экспоненциальная.

Предлагается новый подход к конструкторско-технологическому проектированию ПНПМР, основанный на принципе варибельности формы ВАХ нелинейного элемента, предполагающий возможность целенаправленного подбора формы ВАХ за счет рационального выбора параметров конструкции нелинейного элемента в зависимости от требуемых электрических параметров и конструкции прибора с учетом возможностей технологии. Показана эффективность данного принципа при использовании в конструкции прибора резонансно-туннельного диода (РТД) в качестве нелинейного элемента.

Целенаправленное варьирование формы ВАХ РТД осуществляется рациональным выбором параметров его гетероструктуры. Примеры возможных ВАХ РТД представлены на Рис. 1 (кривые 1,2,3,5,6,7). Для сравнения тут же



приведена ВАХ типичного диода с барьером Шоттки (ДБШ) (кривая 4).

При использовании РТД в качестве нелинейного элемента ПНПМР необходим анализ конструкторско-технологических факторов, влияющих на форму ВАХ, т.к. от нее зависят количество и амплитуда продуктов преобразования, в том числе паразитных, которые определяют потери преобразования полезного сигнала, ширину динамического диапазона входных сигналов и др. характеристики преобразователя. От формы ВАХ зависит дифференциальное

Рис. 1. Примеры возможных ВАХ РТД

сопротивление диода и, как следствие, качество его согласования с другими элементами схемы, что влияет на величину потерь полезного сигнала преобразователя на отражение.

На основе проведенного анализа выдвигается гипотеза, что наиболее критичным элементом конструкции РТД с точки зрения влияния на его ВАХ и электрические параметры прибора является гетероструктура, определяющая форму ВАХ и состоящая из слоев наноразмерной толщины. Вследствие этого следует ожидать существенной чувствительности формы ВАХ и параметров приборов к технологическим погрешностям при изготовлении и деградиационным явлениям как в процессе производства вследствие применения высокотемпературных технологических процессов, так и в процессе эксплуатации в результате воздействия дестабилизирующих факторов. Другим элементом конструкции РТД, оказывающим существенное влияние на ВАХ и электрические параметры приборов, являются омические контакты. От величины контактного сопротивления зависит крутизна ВАХ, дифференциальное сопротивление диода

и, как следствие, условия его согласования с другими элементами преобразователя, потери преобразования и др. параметры.

Проблема обеспечения надежности ПНПМР на этапах конструкторско-технологического проектирования в открытых научно-технических источниках освещена скудно. Систематические исследования данной проблемы ведутся в МГТУ им. Н.Э. Баумана, однако полученные результаты касаются в основном приборов для смешивания частот определенной конструкции, они нуждаются в обобщении, методология обеспечения надежности таких приборов не разработана.

Предварительные исследования, проведенные в МГТУ им. Н.Э. Баумана, показали, что «слабым местом» с точки зрения надежности прибора является РТД. Установлено, что основную долю отказов составляют постепенные отказы, обусловленные деградационными процессами в его структуре. Интенсивность данных процессов зависит от внешних факторов, параметров конструкции, а также технологии изготовления, информация о которых является неполной. Деградационные процессы в РТД приводят к дрейфу его ВАХ и, как следствие, дрейфу электрических параметров приборов, в результате которого происходит выход за пределы установленных ограничений и отказ прибора. Учитывая разнообразие ПНПМР, которые могут быть построены на основе данного элемента, технологических условий изготовления и требований к параметрам приборов, следует предположить, что величина дрейфа ВАХ РТД, приводящая к отказу прибора, для приборов разного функционального назначения и конструкторско-технологического исполнения будет различной.

Решение задачи обеспечения надежности ПНПМР целесообразно вести с использованием физической модели отказов, предполагающей учет закономерностей процессов деградации, приводящих к отказу. Ее использование для проектирования ПНПМР диктует необходимость исследований процессов деградации в РТД в результате воздействия дестабилизирующих факторов как при изготовлении, так и при эксплуатации, а также их влияния на ВАХ диода и электрические параметры приборов.

Современные РЭС могут иметь в своем составе множество однотипных ПНПМР, для изготовления которых используются групповые технологии с использованием прецизионных технологических операций формирования диэлектрических, полупроводниковых, металлических покрытий, литографии, термообработки, химического и плазмо-химического травления, гальванического наращивания и др. Для таких приборов в число приоритетных показателей качества выдвигаются показатели технологической рациональности, характеризующие соответствие принятых конструктивных решений условиям производства и эксплуатации. При этом электрические параметры приборов, показатели надежности и технологической рациональности взаимосвязаны и взаимообусловлены, что диктует необходимость комплексного подхода к проблеме их обеспечения, решение которой целесообразно осуществлять с использованием теории оптимального проектирования приборов.

Таким образом, в первой главе обоснован методологический подход к проблеме обеспечения комплекса показателей качества, а именно, электрических параметров, надежности и технологической рациональности ПНПМР перспективных РЭС, предусматривающий целенаправленный выбор их конструкторско-технологических решений с использованием методов оптимального проектирования. Предложен принцип функциональной вариабельности формы ВАХ нелинейного элемента прибора, позволяющий получать изделия с заданными электрическими характеристиками с учетом технологических возможностей производства, что задает направление разработок, нацеленных на обеспечение электрических параметров ПНПМР перспективных РЭС.

В главе 2 разрабатываются методические средства конструкторско-технологического проектирования, направленные на обеспечение заданных электрических параметров ПНПМР перспективных РЭС с учетом влияния технологии производства прибора.

Проводится анализ закономерностей формирования электрических параметров ПНПМР. Они представляются в виде фазового пространства с траекторией движения, конечным исходом которой является попадание в область допустимых значений или область отказов. Структурная схема фазовых переходов показана на Рис.2. Она делится на три взаимосвязанных блока, где {φ} - пространство параметров конструкции резонансно-туннельного диода, при которых реализуется физический эффект резонансного туннелирования



Рис. 2. Структурная схема фазовых переходов, определяющих формирование электрических параметров ПНПМР

электронов, с учетом возможностей технологии изготовления; F_T – технологическая функция, преобразующая пространство $\{\varphi\}$ в пространство $\{\Gamma\}$ конструкторско-технологических параметров диода, необходимых для обеспечения требуемых электрических параметров прибора; F_D – функция, преобразующая пространство $\{\Gamma\}$ в ВАХ диода с последующим ее преобразованием в пространство $\{A\}$ коэффициентов полинома, описывающего ВАХ; $F_{пч}$ - функция, преобразующая пространство $\{A\}$ в пространство электрических характеристик $\{L\}$ прибора.

Функция F_T , формирующая первый блок представленной схемы, определяется технологическим процессом изготовления. Функция F_D основана на решении уравнения Шредингера с использованием метода матриц переноса и метода конечных разностей. Модель токопереноса учитывает кулоновское взаимодействие между электронами и эффект междолинного рассеяния. В результате строится зависимость плотности тока в гетероструктуре от приложенного напряжения, которая преобразуется в зависимость тока от

напряжения путем учета площади мезы, а также сопротивлений приконтактных областей и омических контактов.

Формирование функции $F_{\text{пч}}$ ведется с применением методов теории цепей, электромагнитного анализа, методов анализа нелинейных схем, для чего используются специализированные программные средства, в частности, такие, как Advanced Design System (ADS) компании Keysight Technologies, AWR Design Environment компании National Instruments и др. По заданным параметрам конструкции прибора и ВАХ нелинейного элемента рассчитывается матрица рассеяния, из которой определяются электрические характеристики $\{L\}$ прибора. Для задания ВАХ в качестве нелинейного сопротивления в программных системах используется ее представление полиномом.

Разрабатываются обобщенная и частные модели фазовых переходов, позволяющие определять электрические характеристики приборов с учетом их вероятностной меры в зависимости от конструктивных характеристик изделия и технологических условий производства. Детерминированные модели описывают формирование электрических характеристик изделия, а стохастические - их вероятностную меру, связанную с технологическими погрешностями производства.

В соответствии с обобщенной моделью определяется чувствительность электрических параметров приборов к изменению параметров конструкции диода. В качестве объектов исследований рассматриваются типовые конструкции ПНПМР, в частности, микрополоскового балансного смесителя частот, выпрямителя и преобразователя (состоит из антенны и выпрямителя – далее «ректенна») маломощных радиосигналов пассивных меток систем радиочастотной идентификации (РЧИД) УВЧ диапазона.

В качестве НЭ рассматриваются двухбарьерные $\text{GaAs-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ РТД. Для смесительного диода выбрана конструкция, реализованная на симметричной (высоты и ширины потенциальных барьеров одинаковы) гетероструктуре, ВАХ которой симметрична относительно начала координат (вид 1, Рис.1).

В качестве выпрямительного используется РТД с ВАХ вида 2 на Рис.1:

$$I(U) = \begin{cases} S_{\text{пр}} U & \text{при } U \geq 0; \\ S_{\text{обр}} U & \text{при } U < 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $S_{\text{пр}}$ и $S_{\text{обр}}$ – проводимость диода в прямом и обратном направлениях, причем $S_{\text{пр}} \gg S_{\text{обр}}$, что реализуется выбором параметров конструкции несимметричной (высоты и ширины потенциальных барьеров различны) гетероструктуры.

При анализе чувствительности электрических параметров смесителя рассматриваются потери преобразования и точка однодецибелной компрессии. В результате анализа определено, что электрические параметры балансного смесителя показывают максимальную чувствительность к ширине симметричных барьеров РТД.

Обобщенная модель формирования электрических параметров ПНПМР используется для определения чувствительности электрических параметров выпрямителя и ректенны пассивных меток систем РЧИД УВЧ диапазона к варьированию параметров конструкции выпрямительного РТД.

Радиус действия систем РЧИД с пассивными метками зависит от способности метки преобразовывать электромагнитное излучение считывателя в постоянный ток для ее электропитания, которая определяется коэффициентом эффективности ректенны. Коэффициент эффективности ректенны

$$K_{\text{э}} = \frac{P_{\text{DC}}}{P_0} = K_{\text{R}} \cdot \eta_{\text{B}}, \quad (2)$$

где P_{DC} - мощность постоянного тока, P_0 - мощность сигнала, принятого антенной, K_{R} - коэффициент согласования антенны и выпрямителя, η_{B} - эффективность выпрямителя.

$$\eta_{\text{B}} = \frac{P_{\text{DC}}}{P_{\text{H}}} \quad K_{\text{R}} = \frac{4 \cdot R_{\text{B}} \cdot R_{\text{A}}}{|Z_{\text{B}} + Z_{\text{A}}|^2}, \quad (3)$$

где P_{H} - мощность переменного ВЧ сигнала на выходе антенны, R_{B} , R_{A} , Z_{B} , Z_{A} - активное и полное сопротивления выпрямителя и антенны соответственно.

В результате анализа чувствительности определено, что на эффективность выпрямителя и коэффициент эффективности ректенны пассивной метки системы РЧИД наибольшее влияние оказывают ширины потенциальных барьеров и площадь мезы диода.

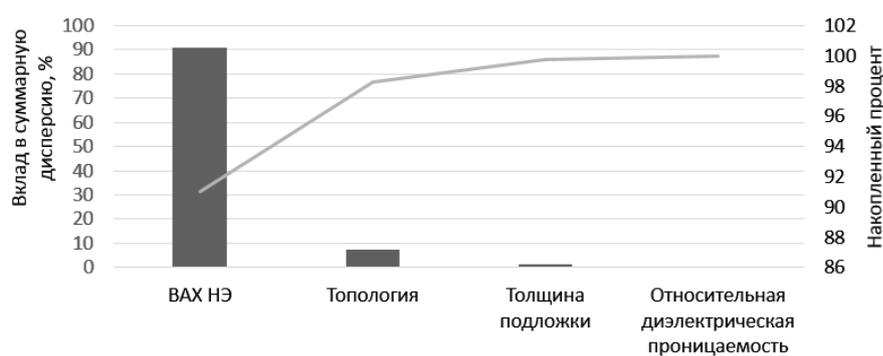
Чувствительность электрических параметров приборов к изменениям параметров РТД обуславливает жесткие требования к технологической точности изготовления и стабильности параметров его конструкции под действием условий эксплуатации. Учитывая, что ширины слоев гетероструктуры составляют единицы нанометров, очевидна необходимость исследования влияния технологических факторов на ВАХ диода и электрические параметры ПНПМР.

Исследование влияния технологических факторов ведется с использованием метода статистических испытаний. Установлено, что основным вклад (почти 90%) в технологический разброс электрических параметров балансного смесителя дает технологический разброс ВАХ РТД. Вклад технологических разбросов других параметров конструкции существенно меньше (около 10%). На Рис.3 показаны вклады дисперсий коэффициентов передачи комбинационных частот вида $f_{\text{с}} - f_{\text{г}} = f_{\text{пч}}$ (промежуточная частота) и $2f_{\text{пч}}$ (вторая гармоника промежуточной частоты, далее КЧ 1-1 и 2-2) под действием технологических разбросов различных параметров конструкции БС в суммарную дисперсию: а) коэффициента передачи КЧ 1-1; б) коэффициента передачи КЧ 2-2.

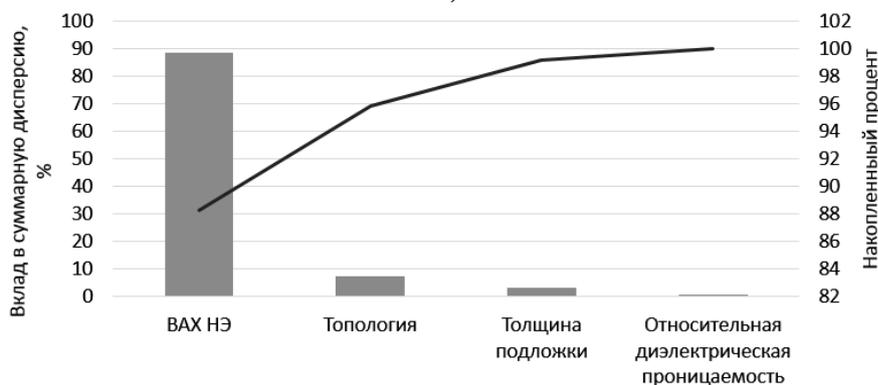
Для системы электропитания пассивных меток систем РЧИД анализ влияния технологических погрешностей метки показал, что вклад технологических погрешностей РТД в разброс радиуса действия системы РЧИД на порядок больше вклада технологических погрешностей остальных элементов конструкции метки.

С использованием обобщенной модели формирования электрических параметров ПНПМР разрабатываются методика и программно-алгоритмические средства обеспечения электрических параметров приборов, исходя из заданных требований в зависимости от конструкторско-технологического решения.

В экспериментальной части проверяются результаты теоретических исследований. За счет использования принципа функциональной варибельности формы ВАХ нелинейного элемента (РТД) достигается: расширение динамического диапазона до 10 дБ, снижение мощности нежелательных комбинационных частот в спектре выходного сигнала на (20-50) дБ, увеличение разности коэффициентов передачи комбинационных частот 1-1 и 2-2 до 25 дБ при сопоставимых значениях потерь преобразования по сравнению с традиционно



а)



б)

Рис. 3. Вклады дисперсий коэффициентов передачи комбинационных частот под действием технологических разбросов различных параметров конструкции БС в суммарную дисперсию

используемыми ДБШ в смесителях частот, что позволяет повысить помехоустойчивость приемника; повышение коэффициента эффективности ректенны до 0,9 и улучшение чувствительности до 10 дБ пассивной метки системы радиочастотной идентификации УВЧ диапазона по сравнению с меткой на основе ДБШ. Это позволяет увеличить радиус действия системы до трех раз или снизить мощность излучения считывателя.

Таким образом, во второй главе определены закономерности формирования электрических параметров ПНПМР, предложены обобщенная и частные модели фазовых переходов, позволяющие определять электрические параметры приборов с учетом их вероятностной меры в зависимости от конструктивных характеристик изделия и технологических условий производства. Определено, что доминирующая роль в формировании технологических допусков на электрические параметры ПНПМР принадлежит технологическим погрешностям

изготовления РТД, что определяет инструментальный подход к управлению качеством при конструкторско-технологическом проектировании и производстве приборов. Разработаны методические и программно-алгоритмические средства, позволяющие обеспечить электрические параметры ПНПМР, исходя из заданных требований в зависимости от конструкторско-технологического решения.

Глава 3 посвящена разработке методов и средств, позволяющих осуществлять проектирование и производство ПНПМР с заданными показателями надежности.

В качестве доминирующего фактора, вызывающего деградацию параметров, выход за пределы ограничений и отказ прибора, в диссертации рассматриваются деградационные процессы в РТД. Разрабатывается физическая модель формирования отказа ПНПМР, базирующаяся на доминирующей роли постепенных отказов, наступающих в результате диффузионных процессов в РТД, приводящих изменению формы ВАХ и, как следствие, дрейфу электрических параметров прибора.

Внешние факторы, вызывающие процессы деградации, могут проявляться как на этапе изготовления (технологические), так и на этапе эксплуатации (эксплуатационные). К технологическим факторам относится повышенная температура. Температурный фактор на этапе изготовления – это высокотемпературный процесс выращивания гетероструктуры и термообработка для формирования омических контактов с минимальным сопротивлением. В качестве эксплуатационных факторов рассматриваются повышенная температура и ионизирующие излучения (ИИ), характерные для условий эксплуатации РЭС космического базирования на круговой околоземной орбите, и вызывающие необратимые изменения в структуре и отказ прибора.

Исследуются деградационные процессы, вызванные указанными факторами. Во-первых – диффузия химических элементов в гетероструктуре РТД и приконтактных областях. Диффузионные процессы, в частности, диффузия Al, приводят к изменению формы потенциальных барьеров и ямы, что, в свою очередь, приводит к изменению прозрачности гетероструктуры и формы ВАХ, отвечающей за качество нелинейного преобразования. Во-вторых, деградация в омических контактах, результатом которой является увеличение контактного сопротивления, изменение формы ВАХ, нарушение согласования диода с элементами схемы, увеличение потерь преобразования.

Методический план исследований процессов деградации в РТД под действием названных факторов состоит из двух блоков. В первом блоке исследуются процессы деградации в гетероструктуре и приконтактных областях, во втором – деградация в омических контактах. Исследуемыми образцами в первом блоке служат GaAs подложки с модельными структурами для исследований диффузионных процессов, во втором – экспериментальные образцы диодов и TLM-структур для определения контактного сопротивления. Для ускорения деградационных процессов в первом и втором блоках осуществляется воздействие температурного фактора и гамма-излучения.

Для процессов диффузии в гетероструктуре и приконтактных областях экспериментально определяется диффузионная длина Al и Si, на основе которой рассчитываются соответствующие коэффициенты диффузии и предэкспоненциальный множитель в уравнении

$$D_{Al,Si} = A \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{k_B T}\right) \cdot \left(\frac{n_{Si}}{n_i}\right)^3, \quad (4)$$

где $D_{Al,Si}$ - коэффициенты диффузии Al и Si в GaAs; k_B - постоянная Больцмана; T - температура; n_{Si} - концентрация легирующей примеси (Si); n_i - концентрация собственных носителей заряда, E_a - энергия активации.

Для определения коэффициентов диффузии разработана расчетно-экспериментальная методика с применением технологии ИК спектроскопической эллипсометрии (ИК-СЭ). Эллипсометрические измерения проводятся на одних и тех же образцах до и после воздействия температурного фактора и ИИ.

На основе полученных в эксперименте значений диффузионной длины для двух значений температуры формирования гетероструктуры определены предэкспоненциальные множители A для Al и Si в уравнении (4). Для гетероструктуры, выращенной при $T=600^\circ\text{C}$, $A=0,22$; для гетероструктуры, выращенной при $T=650^\circ\text{C}$, $A=0,17$. Энергия активации диффузии принята равной 3,5 эВ на основе литературных данных. Таким образом показано, что коэффициент диффузии зависит от технологических условий изготовления гетероструктуры.

В эксперименте под действием гамма-излучения дозой 3,5 Мрад диффузионного размытия Al в исследуемой гетероструктуре не выявлено, что согласуется с экспериментальными данными литературных источников. Известно, что ИИ вызывают изменения электрофизических параметров полупроводников, в частности, концентрации и подвижности носителей заряда. Результаты моделирования показали, что до доз порядка 10 Мрад изменения ВАХ, обусловленные данным фактором, незначительны.

В блоке 2 плана исследований процессов деградации РТД образцы подвергаются воздействию температурного фактора и ИИ с измерением ВАХ до и после воздействий. Исследуются экспериментальные образцы диодов и TLM-структур. Исследуются AuGe/Ni/Au омические контакты, сформированные методом термического вакуумного испарения с термообработкой и дальнейшим гальваническим наращиванием Au.

В результате проведенного эксперимента определены закономерности изменения контактного сопротивления РТД под действием температурного фактора и ИИ. Предложены математические модели, описывающие изменение контактного сопротивления под действием данных факторов. Определены константы, характеризующие скорость изменения контактного сопротивления под действием температурного фактора и ИИ. Показано, что скорость изменения контактного сопротивления под действием данных факторов зависит от технологии производства.

Полученные результаты позволяют приступить к разработке математической модели, позволяющей определять показатели надежности ПНПМР на этапах конструкторско-технологического проектирования. Основными блоками модели являются: математическая модель токопередачи в гетероструктуре, математическая модель деградации в гетероструктуре и приконтактных областях, математическая модель деградации в омических контактах, математическая модель электрических параметров ПНПМР, вероятностные модели параметров конструкции РТД, прибора и внешних воздействий.

На основе модели надежности создается методика (Рис.4) и программный комплекс, предназначенные для определения показателей надежности ПНПМР на этапе проектирования.

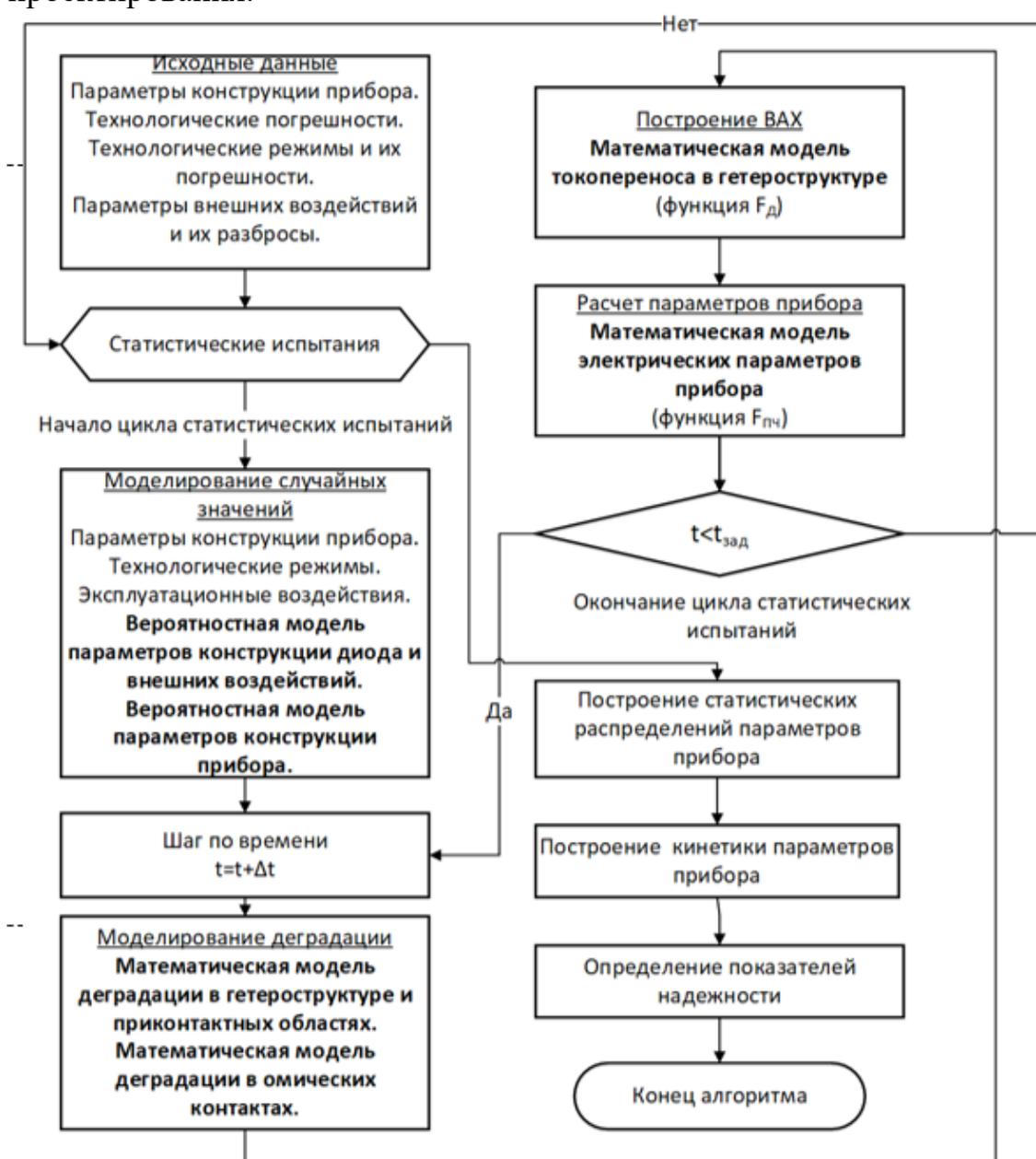


Рис. 4. Структура методики для определения показателей надежности ПНПМР

Определено, что для любого принятого конструкторско-технологического решения доминирующим эксплуатационным фактором, определяющим надежность прибора, является температурное воздействие. При этом отмечено, что влияние ионизирующих излучений менее значимо. В частности, оценки, полученные с использованием экспериментальных данных, а также модели надежности для смесителя частот в составе РЭС космического базирования на круговой околоземной орбите показывают, что гамма-процентная наработка ($\gamma = 0,99$) при эксплуатации под действием температурного фактора при температуре от 85°C до 125°C на порядок меньше, чем наработка при эксплуатации под действием ионизирующих излучений мощностью дозы $10 \dots 30$ крад/год (до дозы порядка 10^8 рад).

Таким образом, в третьей главе предложена и экспериментально обоснована физическая модель формирования отказа, разработана математическая модель, основанная на физической модели, а также разработан программный комплекс, позволяющие определять показатели надежности ПНПМР на этапах конструкторско-технологического проектирования.

Полученные результаты позволяют перейти к проблеме управления качеством приборов при конструкторско-технологическом проектировании и производстве.

В четвертой главе разрабатываются метод и средства управления качеством при конструкторско-технологическом проектировании и производстве ПНПМР с учетом условий эксплуатации.

Разрабатывается метод обеспечения комплекса показателей качества ПНПМР, основанный на решении задачи обеспечения и взаимной увязки заданных электрических параметров, показателей надежности и технологической рациональности изделий, в основе которого лежит теория оптимального синтеза параметров приборов. В процесс проектирования вводится этап конструкторско-технологической оптимизации, на котором осуществляется корректировка параметров исходного варианта конструкции прибора путем учета технологии производства и закономерностей деградации под действием внешних факторов.

В качестве целевой функции конструкторско-технологической оптимизации принимается $P^n_{\Gamma}(0, t_{зад})$, или $P_{\phi}^n(0, t_{зад})$, или t_{γ} , где $P^n_{\Gamma}(0, t_{зад})$ - вероятность попадания электрических параметров приборов в рамки заданных ограничений в течение заданного времени эксплуатации; $P_{\phi}^n(0, t_{зад})$ - функция качества, характеризующая вероятность выполнения заданных функций партией приборов в течение заданного времени эксплуатации; t_{γ} - гамма-процентная наработка. Критерий оптимальности - $\max P^n_{\Gamma}(0, t_{зад})$, или $\max P_{\phi}^n(0, t_{зад})$, или $\max t_{\gamma}$. Управляемые параметры - номиналы параметров конструкции X диода и прибора; ограничения: заданные разработчиком допуски на электрические параметры Y_{max}, Y_{min} ; технологические разбросы параметров конструкции $\sigma_X = const$; ограничение на трудоемкость изготовления изделия $E \leq E_{дон}$.

Результатом конструкторско-технологической оптимизации являются новые номиналы электрических Y_{opt} и конструкционных X_{opt} параметров прибора и достигнутое значение целевой функции.

Функция P^n_{Γ} определяется по следующим формулам. Вероятность годности в момент времени t_i определяется как

$$P^n_{\Gamma}(t_i) = \int_{Y_{min}}^{Y_{max}} f(Y, t = t_i) dY \quad (5)$$

Функция $P^n_{\Gamma}(0, t_{зад})$ определяется по формуле

$$P^n_{\Gamma}(0, t_{зад}) = \int \dots \int_{YD, t} f(Y, t) dY dt \quad (6)$$

где $f(Y, t)$ – функция плотности распределения электрических параметров с

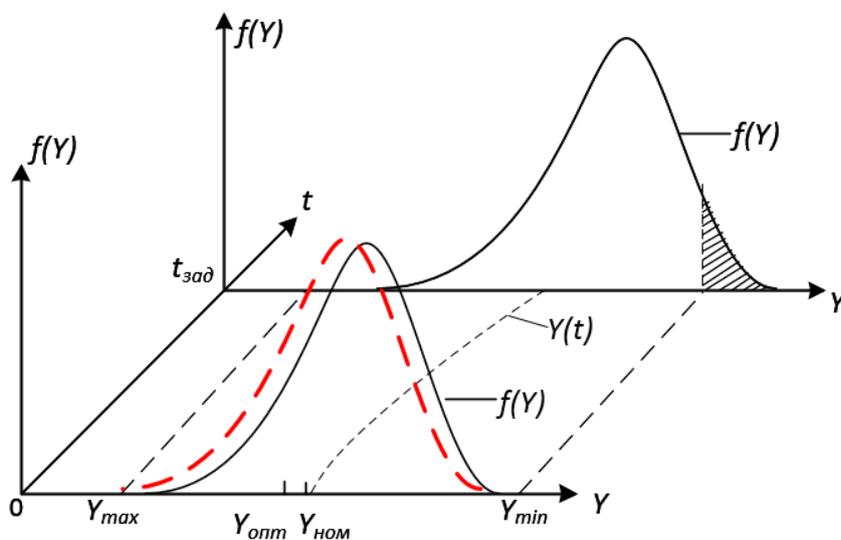


Рис. 5. Графическое представление задачи конструкторско-технологической оптимизации при использовании критерия $\max P^n_{\Gamma}(0, t_{зад})$

электрического параметра в процессе эксплуатации под действием внешних факторов. Сплошной линией показана исходная функция $f(Y)$, штриховой – та же функция после оптимизации.

В связи с тем, что переход прибора в неработоспособное состояние обусловлен постепенным отказом, наблюдается тенденция выделения экспертами в поле допуска электрических параметров областей с различным «качеством» выполнения функций прибором (с различной вероятностью выполнения заданных функций). При этом с использованием метода экспертных оценок строится зависимость вероятности выполнения заданных функций $P_{\phi}(Y)$. При номинальных значениях параметров Y функция $P_{\phi}(Y)=1$, при отклонении от номиналов - принимает значения от 1 до 0. На основе зависимостей $P_{\phi}(Y)$ и функции $f(Y)$ получается функция плотности распределения электрических параметров $f_{\phi}(Y)$ с учетом вероятности выполнения заданных функций как

учетом временного фактора; YD – область, задающая ограничения на допустимые отклонения электрических параметров.

Графическое представление задачи конструкторско-технологической

оптимизации при использовании критерия $\max P^n_{\Gamma}(0, t_{зад})$ показано на Рис. 5. Через $Y_{ном}$ обозначено исходное номинальное значение электрического параметра, $Y(t)$ – функция, описывающая изменение

$$f_{\phi}(Y) = P_{\phi}(Y) f(Y). \quad (7)$$

Путем интегрирования функции $f_{\phi}(Y)$ получается функция качества в момент времени t_i :

$$P_{\phi}^n(t_i) = \int_{Y_{\min}}^{Y_{\max}} f_{\phi}(Y, t = t_i) dY \quad (8)$$

Функция качества в течение заданной наработки определяется по формуле

$$P_{\phi}^n(0, t_{\text{зад}}) = \int \dots \int_{YD, t} f_{\phi}(Y, t) dY dt \quad (9)$$

где $f_{\phi}(Y, t)$ – функция плотности распределения электрических параметров с учетом вероятности выполнения заданных функций и временного фактора.

Графическое представление задачи конструкторско-технологической оптимизации при использовании критерия $\max P_{\phi}^n(0, t_{\text{зад}})$ показано на Рис. 6. Через $P_{\phi \min}$ обозначена минимальная вероятность выполнения заданных функций, соответствующая границам поля допуска Y_{\max} , Y_{\min} , за пределами которого вероятность $P_{\phi} = 0$. Сплошной линией показана исходная функция $f(Y)$, штриховой – та же функция после оптимизации.

Разработан алгоритм решения задачи конструкторско-технологической оптимизации. Алгоритм построен с учетом закономерностей формирования электрических параметров приборов и состоит из пяти последовательных этапов.

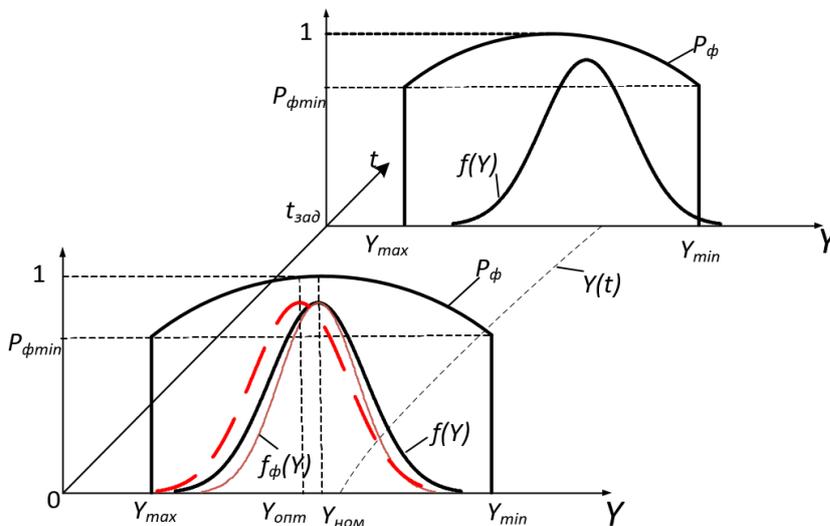


Рис. 6. Графическое представление задачи конструкторско-технологической оптимизации при использовании критерия $\max P_{\phi}^n(0, t_{\text{зад}})$

На первом этапе с использованием метода вероятностного моделирования производится построение функции $f(Y, t)$ и расчет P_{ϕ}^n , P_{ϕ}^n , t_{γ} стартового варианта конструкции прибора. На втором этапе осуществляется синтез номиналов электрических параметров, обеспечивающих требуемые показатели безотказности и технологической рациональности.

Исходными данными служат функция $f(Y, t)$, ограничения Y_{\max} , Y_{\min} , $E_{\text{дон}}$, функция $P_{\phi}(Y)$. Оптимизация ведется по критериям $\max P_{\phi}^n(0, t_{\text{зад}})$, или $\max P_{\phi}^n(0, t_{\text{зад}})$, или $\max t_{\gamma}$. Решение задачи оптимизации осуществляется путем целенаправленного варьирования номиналов электрических параметров относительно заданных ограничений. Варьирование номиналов электрических параметров приводит к сдвигу предварительно построенной функции $f(Y, t)$ относительно ограничений.

Используется последовательная стратегия поиска, реализуемая методами нулевого порядка. Результатом являются новые номиналы Y_{onm} , обеспечивающие экстремум целевой функции.

Они являются исходными данными для третьего этапа конструкторско-технологической оптимизации, на котором определяется форма ВАХ диода и параметры конструкции прибора X_{onm} , при которых обеспечиваются синтезированные на втором этапе номиналы Y_{onm} .

На четвертом этапе конструкторско-технологической оптимизации синтезируются параметры конструкции РТД, обеспечивающие необходимую форму ВАХ. На пятом этапе осуществляется проверка полученного решения.

Алгоритм решения задачи конструкторско-технологической оптимизации изображен на Рис. 7. Применение разработанного метода и конструкторско-технологической оптимизации параметров балансного смесителя частот позволило увеличить функцию качества в течение заданной наработки более, чем на 30%, процент годных приборов – почти на 20%, гамма-процентную наработку при $\gamma=0,99$ - в 7 раз.

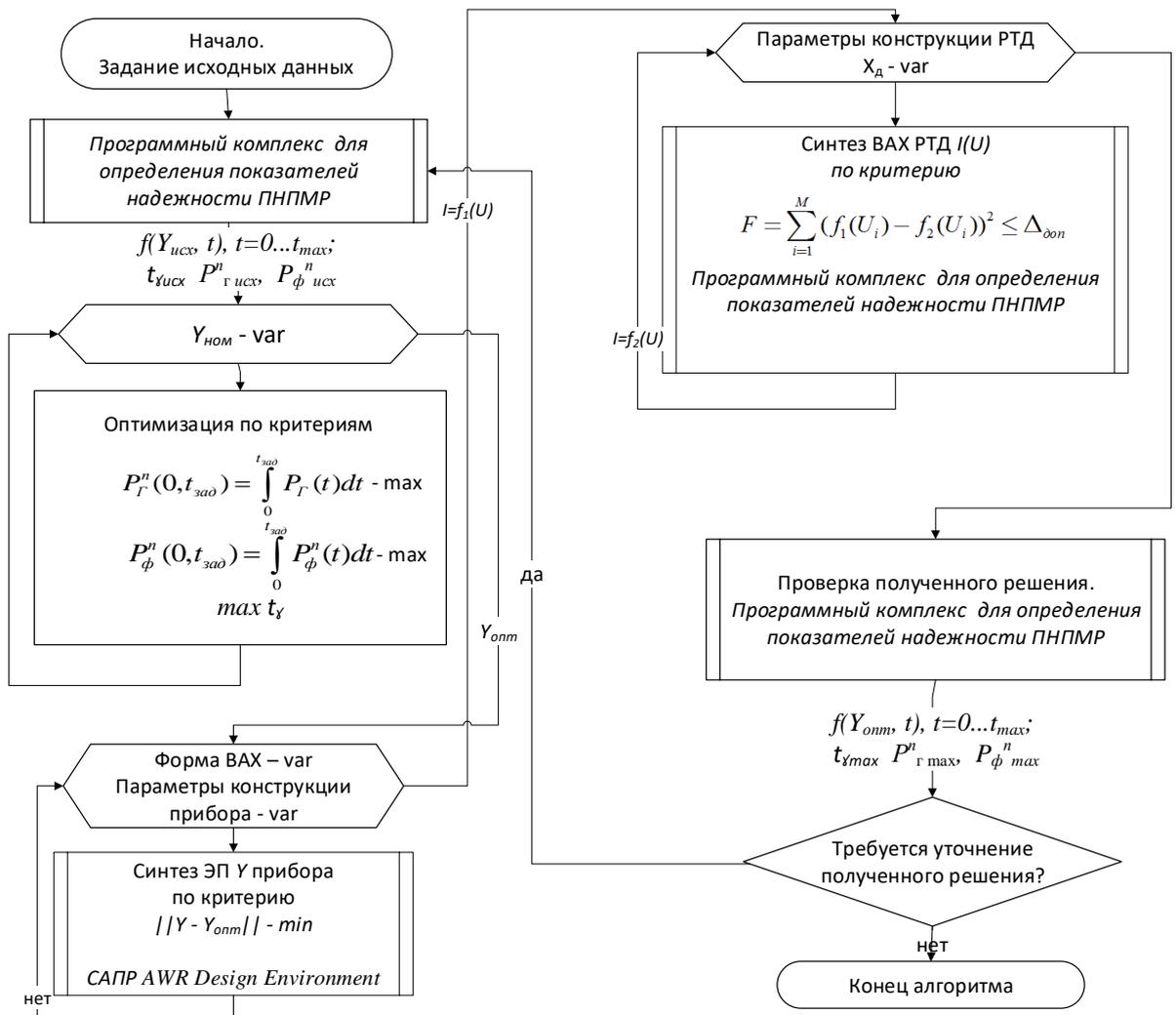


Рис. 7. Алгоритм решения задачи конструкторско-технологической оптимизации

Разработаны программные средства, позволяющие осуществить проведение конструкторско-технологической оптимизации параметров приборов и обеспечить комплекс показателей качества, включая электрические параметры, надежность и технологическую рациональность.

Область применения метода обеспечения комплекса показателей качества приборов не ограничивается ПНПМР на основе РТД. Он может быть использован при проектировании любых микроволновых приборов, для которых построена модель надежности с использованием физической модели отказов.

Для управления показателями надежности ПНПМР предложены технологические средства, предусматривающие совершенствование технологии изготовления путем выбора режимов технологических операций и введения контрольно-диагностических технологических операций в базовую технологию производства.

Разработан алгоритм технологической операции определения требуемого качества гетероструктур для ПНПМР. Количественной оценкой качества гетероструктур служит коэффициент диффузии Al и Si в заданных условиях эксплуатации, который определяет скорость деградации и от которого зависят показатели надежности приборов на их базе. Исследуются GaAs подложки с выращенными в различных технологических условиях гетероструктурами, качество которых зависит от качества исходных подложек, базовой технологии, используемого технологического оборудования и технологических режимов, в частности, температурных режимов операции формирования гетероструктуры.

Описанная операция формирует значение контрольной границы для технологической операции контроля качества гетероструктур ПНПМР, которая позволяет обеспечить надежность партии диодов и приборов, изготовленных на подложке с гетероструктурой требуемого качества.

Технологическая операция определения требуемого качества РТД по скорости изменения ВАХ под действием внешних факторов нацелена на обеспечение индивидуальной надежности РТД и прибора на его основе. Она формирует значения контрольных границ для технологической операции селекции РТД по скорости изменения ВАХ под действием внешних факторов и определяет режимы воздействующих факторов. Операция содержит 2 цикла измерений ВАХ партии диодов: до и после воздействий. Амплитуда и длительность воздействий выбираются такими, чтобы вызванные ими изменения ВАХ были не менее, чем на порядок больше погрешности измерительных средств. В результате обработки данных измерений при помощи разработанного математического аппарата определяются коэффициенты, характеризующие скорость изменения ВАХ в результате деградации, и рассчитываются показатели надежности приборов. В зависимости от гамма-процентной наработки (или др. показателей надежности) диоды относятся к категории низкого, среднего, или высокого качества. Ограничением служит снижение ресурса прибора, вызванное воздействующим фактором, не менее допустимой величины Δ_{don} . В случае его

нарушения режимы воздействий корректируются. Определенные таким образом режимы воздействий и диапазон изменения тока ВАХ в рабочей точке, соответствующий каждой категории качества диодов, служат основой технологической операции селекции диодов по скорости изменения ВАХ под действием внешних факторов. Операция также включает в себя измерения ВАХ до и после воздействий, но не требует привлечения математического аппарата для обработки экспериментальных данных.

Средства конструкторско-технологической оптимизации и описанные технологические средства обладают кумулятивным свойством, что позволяет последовательно осуществлять меры по обеспечению и повышению показателей надежности приборов.

Таким образом, в четвертой главе разработан метод обеспечения комплекса показателей качества приборов, обобщенный алгоритм и программные средства конструкторско-технологической оптимизации, технологические средства управления показателями надежности ПНПМР.

В пятой главе разработаны инженерные методики обеспечения производства приборов для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов. Разработаны новые конструкторско-технологические решения приборов и РТД, позволяющие обеспечить заданные показатели качества с учетом технологических возможностей производства и условий эксплуатации.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы. В диссертационной работе решена научно-техническая проблема обеспечения конструкторско-технологическими методами эффективного проектирования и производства приборов для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов перспективных РЭС, имеющих требуемые электрические параметры, показатели надежности и технологической рациональности в заданных условиях эксплуатации.

1. Обоснован методологический подход к проблеме конструкторско-технологического обеспечения проектирования и производства приборов для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов перспективных РЭС, предусматривающий рациональный выбор их конструкторско-технологических решений с использованием методов оптимального проектирования. Предложен принцип функциональной вариабельности формы воль-амперной характеристики нелинейного элемента прибора, позволяющий получать изделия с заданными электрическими характеристиками с учетом технологических возможностей производства. Показана эффективность данного принципа при использовании в конструкции прибора резонансно-туннельного диода в качестве нелинейного элемента.

2. Определены закономерности формирования электрических параметров приборов для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов, представленные в виде фазового пространства с траекторией движения, конечным исходом которой является попадание в область их допустимых значений или в область отказов. Структура отображения реализована на последовательном

преобразовании: пространство параметров конструкции резонансно-туннельного диода, при которых реализуется физический эффект резонансного туннелирования электронов, с учетом возможностей технологии изготовления – пространство конструкторско-технологических параметров резонансно-туннельного диода, необходимых для обеспечения требуемых электрических параметров прибора – вольт-амперная характеристика резонансно-туннельного диода - пространство электрических параметров прибора.

3. Разработаны обобщенная и частные модели фазовых переходов, позволяющие определять электрические характеристики приборов для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов с учетом их вероятностной меры в зависимости от конструктивных характеристик изделия и технологических условий производства. Детерминированные модели описывают формирование электрических характеристик изделия, а стохастические - их вероятностную меру, связанную с технологическими погрешностями производства.

4. Определено, что доминирующая роль в формировании технологических допусков на электрические параметры приборов для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов принадлежит технологическим погрешностям изготовления резонансно-туннельного диода, что определяет инструментальный подход к управлению качеством при конструкторско-технологическом проектировании и производстве приборов. Установлено, что основной вклад (почти 90%) в технологический разброс электрических параметров балансного смесителя дает технологический разброс ВАХ РТД. Вклад технологических погрешностей РТД в разброс радиуса действия системы радиочастотной идентификации с пассивными метками УВЧ диапазона на порядок больше вклада технологических погрешностей остальных элементов конструкции метки.

5. За счет использования принципа функциональной вариабельности формы вольт-амперной характеристики нелинейного элемента (резонансно-туннельного диода) при конструкторско-технологическом проектировании приборов для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов различного назначения достигается повышение электрических параметров приборов, а именно: расширение динамического диапазона до 10 дБ, снижение мощности нежелательных комбинационных частот в спектре выходного сигнала на (20-50) дБ, увеличение разности коэффициентов передачи комбинационных частот 1-1 и 2-2 до 25 дБ при сопоставимых значениях потерь преобразования по сравнению с традиционно используемыми диодами с барьером Шоттки в смесителях частот, что позволяет повысить помехоустойчивость приемника; повышение коэффициента эффективности ректенны до 0,9 и улучшение чувствительности до 10 дБ пассивной метки системы радиочастотной идентификации УВЧ диапазона по сравнению с меткой на основе диода с барьером Шоттки. Это позволяет увеличить радиус действия системы до 3-х раз или снизить мощность излучения считывателя.

6. Разработана физическая модель формирования отказа приборов для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов, базирующаяся на доминирующей роли постепенных отказов, наступающих в результате диффузионных процессов в резонансно-туннельном диоде, приводящих к изменению формы вольт-амперной характеристики и, как следствие, дрейфу электрических параметров прибора. Для определения численных характеристик диффузионных процессов разработана расчетно-экспериментальная методика с применением технологии ИК спектроскопической эллипсометрии.

7. Разработана математическая модель, позволяющая определять показатели надежности приборов для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов на этапах конструкторско-технологического проектирования и базирующаяся на детерминированных моделях, описывающих закономерности изменения электрических параметров под действием внешних факторов за счёт учета доминирующих механизмов деградации, а также статистических моделях, описывающих их вероятностные характеристики, связанные со случайным варьированием параметров технологии производства и внешних воздействий.

8. Определено, что для любого принятого конструкторско-технологического решения доминирующим эксплуатационным фактором, определяющим надежность прибора, является температурное воздействие. При этом отмечено, что влияние ионизирующих излучений менее значимо. В частности, оценки, полученные с использованием экспериментальных данных, а также модели надежности смесителя частот в составе РЭС космического базирования на круговой околоземной орбите показывают, что гамма-процентная наработка ($\gamma=0,99$) при эксплуатации под действием температурного фактора при температуре от 85°C до 125°C на порядок меньше, чем наработка при эксплуатации под действием ионизирующих излучений мощностью дозы $10\dots30$ крад/год (до дозы порядка 10^8 рад).

9. Разработан метод обеспечения комплекса показателей качества приборов для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов при конструкторско-технологическом проектировании и производстве, в основе которого лежит теория оптимального синтеза параметров приборов. Применение разработанного метода позволило увеличить функцию качества в течение заданной наработки балансного смесителя частот более, чем на 30%, процент годных приборов – почти на 20%, гамма-процентную наработку при $\gamma=0,99$ - в 7 раз.

10. Разработан алгоритм конструкторско-технологической оптимизации, учитывающий закономерности формирования электрических параметров приборов, состоящий из пяти последовательных этапов: построение функции плотности распределения электрических параметров и расчет показателей безотказности и технологической рациональности стартового варианта конструкции прибора; синтез новых номиналов электрических параметров путем целенаправленного варьирования функции плотности их распределения относительно заданных ограничений, обеспечивающих требуемые показатели

безотказности и технологической рациональности; синтез оптимальной формы ВАХ нелинейного элемента; синтез параметров конструкции прибора; проверка полученного решения.

11. Разработаны технологические средства, предусматривающие выбор режимов технологических операций и введение контрольно-диагностических технологических операций в базовую технологию производства для управления показателями надежности приборов для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов.

12. Разработаны методические и программно-алгоритмические средства, позволяющие:

- обеспечить требуемые электрические параметры приборов для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов, исходя из заданных требований в зависимости от конструкторско-технологического решения.

- обеспечить заданные показатели надежности приборов на этапе проектирования в зависимости от конструкторско-технологического решения.

- осуществить проведение конструкторско-технологической оптимизации параметров приборов, позволяющей обеспечить комплекс показателей качества, включая электрические параметры, надежность и технологическую рациональность.

13. Разработаны инженерные методики обеспечения производства приборов для нелинейных преобразований микроволновых радиосигналов.

14. Разработаны новые конструкторско-технологические решения приборов и резонансно-туннельных диодов, позволяющие обеспечить заданные показатели качества с учетом технологических возможностей производства и условий эксплуатации. Результаты работы внедрены в НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва, на предприятии АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга», г. Москва, ООО «Технологии идентификации», г. Москва, а также в учебный процесс подготовки дипломированных специалистов по специальности «Проектирование и технология радиоэлектронных средств», магистров и бакалавров по направлению «Наноинженерия» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Список основных публикаций автора по теме диссертации

1 К вопросу о моделировании кинетики ВАХ AlGaAs-гетероструктур / С.А. Мешков [и др.] // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2019. Т. 11, № 3. С. 299–306. (0,5 п.л./0,2 п.л.).

2 Моделирование кинетики вольт-амперных характеристик резонансно-туннельных диодов под действием дестабилизирующих факторов / С. А. Мешков [и др.] // Изв. ВУЗов. Приборостроение, 2019. Т.62, №10. С. 929-940. (0,7 п.л./0,35 п.л.).

3 Мешков С.А. Методология учета технологических и эксплуатационных факторов при проектировании микро-и наноприборов // Изв. ВУЗов. Приборостроение, 2019. Т.62, №10. С. 921-928. (0,5 п.л.).

- 4 Программный комплекс расчета начального участка ВАХ резонансно-туннельного диода с возможностью проведения машинного статистического эксперимента / С.А. Мешков [и др.] // Успехи современной радиоэлектроники, 2019. № 3. С. 28-36. (0,5 п.л./0,25 п.л.).
- 5 Мешков С.А. Методические и алгоритмические средства автоматизированного вероятностного анализа параметров СВЧ-микросхем // Успехи современной радиоэлектроники. 2018. №9. С. 15-24. (0,6 п.л.)
- 6 Моделирование токопереноса в AlAs/GaAs-гетероструктурах с учётом междолинного рассеивания / С. А. Мешков [и др.] // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2018. Т. 10, № 1. С. 71–76. (0,4 п.л./0,2 п.л.).
- 7 Прогнозирование надёжности AlGaAs резонансно-туннельных диодов и нелинейных преобразователей СВЧ радиосигналов на их основе / С. А. Мешков [и др.]. // Российские нанотехнологии, 2017. Т.12, №7-8. С. 33-40. (0,5 п.л./0,3 п.л.).
- 8 Мешков С.А., Макеев М.О., Синякин В. Ю. Токоперенос в резонансно-туннельных наноструктурных AlAs/GaAs диодах в процессе их деградации // Наноматериалы и наноструктуры XXI век, 2017. Т.8, №3. С. 43-48. (0,4 п.л./0,2 п.л.).
- 9 Исследование термической деградации омических контактов AlAs/GaAs резонансно-туннельных диодов на основе анализа кинетики вольт-амперных характеристик / С. А. Мешков [и др.] // Электрометаллургия. 2017. №9. С. 24-30. (0,5 п.л./0,25 п.л.).
- 10 Повышение эффективности ректенны в инвазивных биосенсорных системах на базе технологии радиочастотной идентификации за счет применения резонансно-туннельных нанодиодов / С. А. Мешков [и др.] // Машиностроитель. 2016. №1. С. 44-50. (0,5 п.л./0,25 п.л.).
- 11 Исследования диффузионных процессов в наноразмерных AlAs/GaAs полупроводниковых резонансно-туннельных гетероструктурах / С. А. Мешков [и др.] // Технология металлов. 2016. №9. С. 31-38. (0,5 п.л./0,25 п.л.).
- 12 Мешков С.А., Макеев М. О., Иванов Ю. А. Исследования коэффициентов диффузии Al и Si в AlAs/GaAs резонансно-туннельных гетероструктурах // Нано-и микросистемная техника. 2016. Т.18. №8. С. 493-502. (0,6 п.л./0,3 п.л.).
- 13 Мешков С.А., Макеев М. О., Иванов Ю. А. Оценка стойкости к диффузионной деструкции наноразмерных AlAs/GaAs резонансно-туннельных гетероструктур методом ИК-спектральной эллипсометрии // Физика и техника полупроводников, 2016. Т.50, №1. С. 83-88. (0,4 п.л./0,2 п.л.).
- 14 Использование РТД в выпрямителях ВЧ сигналов малой мощности / С. А. Мешков [и др.] // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения, 2015. Т.15. №5. С. 93-95. (0,4 п.л./0,2 п.л.).
- 15 Исследование возможностей радиочастотной идентификации с пассивными метками в инвазивной биосенсорике / С. А. Мешков [и др.] // Медицинская техника, 2015. №2(290). С. 26-29. (0,4 п.л./0,2 п.л.).

- 16 Моделирование кинетики вольт-амперных характеристик AlAsGaAs резонансно-туннельных диодов в результате диффузионных процессов в его структуре / С. А. Мешков [и др.]. //Наноинженерия, 2014. №1(31). С. 24-29. (0,5 п.л./0,25 п.л.).
- 17 Исследования термической деградации резонансно-туннельных диодов на базе AlAs/GaAs наногетероструктур / С. А. Мешков [и др.] //Нано- и микросистемная техника, 2014. №12(173). С. 23-29. (0,5 п.л./0,25 п.л.).
- 18 Об одном подходе к проектированию микроэлектронных нелинейных преобразователей СВЧ радиосигналов на основе многослойных полупроводниковых наноразмерных резонансно-туннельных гетероструктур / С. А. Мешков [и др.]. //Техника машиностроения, 2014. Т.21, №3(91) С. 11-18. (0,5 п.л./0,3 п.л.).
- 19 Применение резонансно-туннельных нанодиодов для повышения эффективности преобразователя электромагнитной энергии инвазивных биосенсорных систем на базе технологии радиочастотной идентификации / С. А. Мешков [и др.] //Нанотехнологии: разработка, применение-XXI век, 2014. Т.6, №2 С. 15-20. (0,45 п.л./0,25 п.л.).
- 20 Выбор схемотехнических, конструкторских и технологических решений при разработке инвазивного транзисторного биосенсора / С. А. Мешков [и др.] //Электромагнитные волны и электронные системы, 2014. Т.19, №4. С. 66-70. (0,5 п.л./0,1 п.л.).
- 21 Применение технологии радиочастотной идентификации с пассивными метками в инвазивной биосенсорике / С. А. Мешков [и др.] //Машиностроитель, 2014. №5. С. 12-20. (0,5 п.л./0,2 п.л.).
- 22 К вопросу о повышении надежности смесительных AlAs/GaAs резонансно-туннельных диодов конструкторско-технологическими методами / С. А. Мешков [и др.] //Наука и образование: электронное научно-техническое издание, 2013. №11. С. 229-242. DOI:10.7463/1113.0637834. (0,8 п.л./0,5 п.л.).
- 23 Исследования деградации резонансно-туннельных диодов на базе AlAs/GaAs наногетероструктур / С. А. Мешков [и др.] //Инженерный журнал: наука и инновации, 2013. №6(18). DOI:10.18698/2308-6033-2013-6-811. (0,5 п.л./0,25 п.л.).
- 24 Смеситель радиосигналов на основной гармонике гетеродина на основе резонансно-туннельного диода / С. А. Мешков [и др.] //Техника машиностроения, 2013. №2(86). С. 40-44. (0,4 п.л./0,2 п.л.).
- 25 Мешков С. А. Конструкторско-технологическое проектирование микроэлектронных нелинейных преобразователей СВЧ радиосигналов на основе многослойных полупроводниковых наноразмерных резонансно-туннельных гетероструктур // Инженерный журнал: наука и инновации, 2013. №6(18). DOI:10.18698/2308-6033-2013-6-800. (0,5 п.л.).
- 26 Исследование параметров субгармонического смесителя радиосигналов на основе резонансно-туннельного диода / С. А. Мешков [и др.] //Техника машиностроения, 2013. №1(85). С. 24-29. (0,4 п.л./0,2 п.л.).

- 27 Исследование термической деградации AuGeNi омических контактов резонансно-туннельных диодов на базе наноразмерных AlAs/GaAs гетероструктур / С. А. Мешков [и др.] //Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. № 9. С. 177-196. (1,1 п.л./0,5 п.л.).
- 28 Перспективы разработки нелинейных преобразователей радиосигналов на базе резонансно-туннельных нанодиодов / С. А. Мешков [и др.] //Вестник Московского государственного технического университета им. НЭ Баумана. Серия «Приборостроение», 2012. №. 4(89). С. 100-113. (0,9 п.л./0,5 п.л.).
- 29 Мешков С.А. Шашурин В. Д., Ветрова Н. А. Обеспечение надежности смесителей радиосигналов на резонансно-туннельных диодах на этапе их сборки // Сборка в машиностроении, приборостроении, 2012. №7. С. 40-45. (0,5 п.л./0,25 п.л.).
- 30 Гетероструктурная СВЧ-электроника в России / С. А. Мешков [и др.] //Электромагнитные волны и электронные системы, 2012. Т.17, №1. С. 4-9. (0,4 п.л./0,2 п.л.).
- 31 Использование метода ИК-спектроскопии для определения толщины слоя образца ПТФЭ, модифицированного в разряде постоянного тока / С. А. Мешков [и др.]. // Химия Высоких Энергий, 2011. Т.45. №6. С. 574-576. (0,4 п.л./0,2 п.л.).
- 32 Улучшение параметров смесителей радиосигналов за счет применения резонансно-туннельных диодов / С. А. Мешков [и др.] //Техника и приборы СВЧ, 2011. №2. С. 1-9. (0,5 п.л./0,25 п.л.).
- 33 Мешков С.А., Макеев М. О., Иванов Ю. А. Исследование деградационных явлений в наноразмерных AlAs/GaAs гетероструктурах методом ИК-спектроскопии // Наноинженерия, 2011. №4. С. 44-48. (0,5 п.л./0,2 п.л.).
- 34 Повышение показателей качества радиоэлектронных систем нового поколения за счет применения резонансно-туннельных нанодиодов / С. А. Мешков [и др.] //Наноинженерия, 2011. №2. С. 20-23. (0,4 п.л./0,2 п.л.).
- 35 Повышение показателей качества радиоэлектронных систем нового поколения за счет применения резонансно-туннельных нанодиодов / С. А. Мешков [и др.] //Наноинженерия, 2011. №1. С. 34-44. (0,8 п.л./0,4 п.л.).
- 36 Исследование физико-химических свойств поверхности политетрафторэтилена методом ИК-спектроскопии / С. А. Мешков [и др.] //Нанотехника, 2011. №3(27). С. 27-32. (0,5 п.л./0,2 п.л.).
- 37 Субгармонический смеситель с улучшенными интермодуляционными характеристиками на базе резонансно-туннельного диода / С. А. Мешков [и др.] //Радиотехника и электроника, 2010. Т.55, №8. С. 982-988. (0,5 п.л./0,25 п.л.).
- 38 Мешков С.А., Гудков А.Г., Агасиева С.В. Оптимальное проектирование гетероструктуры для смесителей радиосигналов на основе резонансно-туннельных диодов // Биомедицинская радиоэлектроника, 2010. №10. С. 61-67. (0,5 п.л./0,25 п.л.).
- 39 Улучшение параметров приемника СВЧ-диапазона применением резонансно-туннельного нанодиода в преобразователе частоты / С. А. Мешков [и

- др.] //Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение, 2010. №5. С. 128-137. (0,65 п.л./0,3 п.л.).
- 40 Исследование металлоорганических гетероструктур методами широкополосной ИК эллипсометрии-спектроскопии / С. А. Мешков [и др.] //Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. – 2010. – №5. – С. 80-91. (0,7 п.л./0,3 п.л.).
- 41 Мешков С.А., Гудков А.Г., Хныкина С.В. Прогнозирование качества и надежности ИС СВЧ на этапах разработки и производства. Часть 12. Контроль качества МИС СВЧ на основе РТД // Машиностроитель, 2010. №4. С. 31-40. (0,7 п.л./0,4 п.л.).
- 42 Повышение показателей качества назначения субгармонического смесителя радиосигналов за счет применения резонансно-туннельного диода / С. А. Мешков [и др.] //Сетевой электронный научный журнал «Системотехника», 2010. №8. С. 63-65. (0,4 п.л./0,2 п.л.).
- 43 Мешков С.А., Хныкина С.В. Выбор информативных параметров для оценки деградации гетероструктуры резонансно-туннельного нанодиода и смесителя на его основе // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2007. Т.5. №1. С. 43-53. (0,6 п.л./0,4 п.л.)
- 44 Мешков С.А. Максимизация вероятности выхода годных технических устройств со случайными параметрами методом покоординатного сдвига функции плотности вероятности // Инструмент, технология, оборудование, 2005. № 2. С. 13-18. (0,4 п.л.)
- 45 Способ повышения надежности и качества функционирования партии гибридных и монолитных интегральных схем: патент № 2684943 РФ / С.А. Мешков; заявл. 21.06.2018; опубл. 16.04.2019.
- 46 Способ повышения надежности гибридных и монолитных интегральных схем: патент № 2664759 РФ / С.А. Мешков; заявл. 29.11.2017; опубл. 22.08.2018.
- 47 Способ определения стойкости к радиационным и температурным воздействиям наноэлектронного резонансно-туннельного диода (РТД) на основе многослойных AlGaAs (алюминий, галлий, арсеникум) полупроводниковых гетероструктур : патент № 2606174 РФ / С.А. Мешков [и др.]; заявл. 07.08.2015; опубл. 10.01.2017.
- 48 Способ определения стойкости полупроводниковых приборов СВЧ к воздействию ионизирующих излучений: патент № 2602416 РФ / С.А. Мешков [и др.]; заявл. 07.08.2015; опубл. 20.11.2016.
- 49 Преобразователь энергии электромагнитной волны СВЧ-диапазона в постоянное напряжение: патент № 2443050 РФ / С.А. Мешков [и др.]; заявл. 20.07.2010; опубл. 20.02.2012.
- 50 Наноэлектронный полупроводниковый выпрямительный диод: патент № 241594 РФ / С.А. Мешков [и др.]; заявл. 16.02.2010; опубл. 27.03.2011.
- 51 Наноэлектронный полупроводниковый выпрямительный диод: патент № 241294 РФ / С.А. Мешков [и др.]; заявл. 16.02.2010; опубл. 27.02.2011.

- 52 Нанoeлектронный полупроводниковый выпрямительный диод: патент № 241295 РФ / С.А. Мешков [и др.]; заявл. 16.02.2010; опубл. 27.02.2011.
- 53 Нанoeлектронный полупроводниковый смесительный диод: патент № 2372691 РФ / С.А. Мешков [и др.]; заявл. 19.08.2008; опубл. 10.11.2009.
- 54 Нанoeлектронный полупроводниковый смесительный диод: патент № 2372692 РФ / С.А. Мешков [и др.]; заявл. 19.08.2008; опубл. 10.11.2009.
- 55 Нанoeлектронный полупроводниковый смесительный диод: патент № 2372693 РФ / С.А. Мешков [и др.]; заявл. 19.08.2008; опубл. 10.11.2009.
- 56 Нанoeлектронный полупроводниковый смесительный диод: патент № 2372693 РФ / С.А. Мешков [и др.]; заявл. 19.08.2008; опубл. 10.11.2009.
- 57 Программный комплекс самосогласованного моделирования токопереноса в AlGaAs-гетероструктурах с непрерывным профилем примесей: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019616511. / С.А. Мешков [и др.]; заявл. 15.05.2019; опубл. 23.05.2019.
- 58 Программный комплекс расчета начального участка вольт-амперных характеристик GaAs/AlGaAs резонансно-туннельных диодов с возможностью проведения машинного статистического эксперимента: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018661051. / С.А. Мешков [и др.]; заявл. 07.08.2018; зарегистр. 31.08.2018.
- 59 Программа моделирования вольт-амперных характеристик AlGaAs резонансно-туннельных диодов с учетом воздействия дестабилизирующих факторов: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016663663. / С.А. Мешков [и др.]; Заявл. 25.10.2016; Опубл. 10.01.2017.
- 60 dif2RTD: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012661001 / С.А. Мешков [и др.]; Заявл. 23.10.2012; Зарегистр. 05.12.2012.

**Публикации в изданиях материалов международных НТК,
индексируемых в международных БД WoS и Scopus**

- 61 Meshkov S. A., Makeev M.O., Sinyakin V.Yu. Reliability prediction of resonant tunneling diodes and non-linear radio signal converters based on them under influence of temperature factor and ionizing radiations // Advances in Astronautical Sciences. 2020. V.170. P. 655-664. (0,6 п.л./0,3 п.л.).
- 62 Statistical model of passive tag for production processes automation RFID system parametric failures / S.A. Meshkov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 709, I. 3. P. 044048. (0,4 п.л./0,2 п.л.).
- 63 Microelectronics Devices Optimal Design Methodology with Regard to Technological and Operation Factors / S.A. Meshkov [et al.] // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 982. pp 517-523. (0,4 п.л./0,2 п.л.).
- 64 Meshkov S. A., Cherkasov K.V., Makeev M.O. Modeling of resonant-tunneling diodes I-V characteristics' kinetics under destabilizing factors' influence during operation // 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon 2019). P. 8867795. (0,4 п.л./0,2 п.л.).

- 65 Quantum-mechanical models for calculating the electrical characteristics of semiconductor 2-d structures for technological optimization of nanoelectronics devices based on them / S.A. Meshkov [et al.] // Journal of Physics: Conf. Ser. 2019. V. 1410. P. 012194. (0,3 п.л./0,1 п.л.).
- 66 Simulation of AlGaAs-heterostructures CVC kinetic due to degradation / S.A. Meshkov [et al.] // Journal of Physics: Conf. Ser. 2019. V. 1410. P 012055. (0,3 п.л./0,15 п.л.).
- 67 Designing radio electronic systems for space purposes optimal by the criterion of reliability based on ultra-high-speed heterostructure nanoelectronics devices / S.A. Meshkov [et al.] // AIP Conference Proceedings. 2019. V. 2171. P. 150004. (0,4 п.л./0,2 п.л.).
- 68 Prediction of the electrical characteristics of heterostructural microwave devices with transverse current transfer based on a quantum-mechanical self-consistent model of a nanoscale channel with taking into account inter-valley scattering / S.A. Meshkov [et al.] // ITM Web of Conferences. 2019. V. 30. P. 08004. (0,3 п.л./0,1 п.л.).
- 69 Computer Statistical Experiment for Analysis of Resonant-Tunneling Diodes I-V Characteristics / S.A. Meshkov [et al.] // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Vol. 983. pp 626-634. (0,5 п.л./0,25 п.л.).
- 70 Meshkov S. A. Methodology of technological and operational factors accounting in the process of complex optimal design of micro and nanodevices manufactured using group technologies // MATEC Web Conf. – 2018. – V. 224. – P. 02094. (0,4 п.л.).
- 71 Meshkov S.A., Makeev M.O., Sinyakin V.Yu. Reliability prediction of radio frequency identification passive tags power supply systems based on A3B5 resonant-tunneling diodes // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon 2018). 2018. P. 8501748. (0,4 п.л./0,2 п.л.).
- 72 Meshkov S.A., Cherkasov K.V., Makeev M.O. Application of computer statistical experiment for studying resonant-tunneling diodes parameters reproducibility under batch production conditions / // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon 2018). 2018. P. 8501823. (0,4 п.л./0,2 п.л.).
- 73 Meshkov S.A., Makeev M.O., Sinyakin V.Yu. Reliability prediction of RFID passive tags power supply systems based on RTD under given operating conditions // MATEC Web Conf. 2018. V. 224. P. 02095. (0,4 п.л./0,2 п.л.).
- 74 Meshkov S.A., Cherkasov K.V., Makeev M.O. Software complex for calculating the initial section of the current-voltage characteristics of a resonant-tunneling diode with the possibility of computer statistical experiment // Journal of Physics: Conf. Ser. 2018. V. 1124. P. 071015. (0,4 п.л./0,2 п.л.).
- 75 Spacecraft guidance, navigation and control based on application of resonant tunneling diodes in non-linear radio signal converters / S.A. Meshkov [et al.] // Advances in Astronautical Sciences. 2017. V. 161. P. 475-482. (0,5 п.л./0,2 п.л.).
- 76 Meshkov S.A., Makeev M.O., Sinyakin V.Yu. Prediction of electronic nanodevices technical status and reliability based on analysis of their performance parameters kinetics under the influence of external factors // MATEC Web Conf. 2017. V. 129. P. 03019. (0,4 п.л./0,2 п.л.).

77 Meshkov S.A., Makeev M.O., Sinyakin V.Yu. Degradation study of AlAs/GaAs resonant tunneling diode IV curves under influence of high temperatures // Journal of Physics: Conf. Ser. 2017. V. 917. P. 092004. (0,4 п.л./0,2 п.л.).