

42061651

На правах рукописи

УДК 621.382

МАКЕЕВ МСТИСЛАВ ОЛЕГОВИЧ

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ
ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ СМЕСИТЕЛЕЙ РАДИОСИГНАЛОВ
НА ОСНОВЕ РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДОВ

Специальность 05.11.14 – Технология приборостроения,
05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников,
материалов и приборов электронной техники

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук



Москва-2014

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете
имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
профессор

Иванов Юрий Александрович

Научный консультант:
кандидат технических наук, доцент

Мешков Сергей Анатольевич

Официальные оппоненты:

Румянцев Константин Евгеньевич, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой информационной безопасности телекоммуникационных систем
ФГАОУ ВПО "Южный федеральный университет"

Сушенцов Николай Иванович, кандидат технических наук, доцент, заведующий
кафедрой конструирования и производства радиоэлектронной аппаратуры ФГБОУ ВПО
«Поволжский государственный технологический университет»

Ведущее предприятие – ФГУП «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга»

Защита диссертации состоится «02» 10 2014 г. 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

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просьба
выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Телефон для справок 8 (499) 267-09-63

Автореферат разослан «28» 08 2014г.



Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.18
д.т.н., профессор

Цветков Ю.Б.

31402

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Одним из путей улучшения качества радиоэлектронных систем является использование полупроводниковых приборов, функционирующих на основе квантоворазмерных эффектов. К таким приборам относятся резонансно-туннельные диоды (РТД) на базе многослойных наноразмерных AlAs/GaAs резонансно-туннельных гетероструктур (РТГС) с поперечным токопереносом. Малое время туннелирования электронов ($\sim 10^{-14}$ с) обеспечивает предельно высокое быстродействие диода (частота ~ 1 ТГц) и подавление дробовых шумов. Изменяя параметры слоев РТГС (толщину, химический состав), можно варьировать форму вольт-амперной характеристики (ВАХ). Такие свойства РТД позволяют создавать на его базе различные нелинейные преобразователи радиосигналов: смесители, выпрямители, умножители и генераторы для диапазонов СВЧ и КВЧ, функциональные характеристики которых могут быть улучшены за счет оптимизации формы ВАХ нелинейного элемента.

Смесители радиосигналов (СмР) конструктивно реализуются в виде монолитной или гибридной интегральной схемы. Их конструкция включает в себя подложку, на которой реализуется интегральная схема, расположенные на ней пассивные элементы и, собственно, диод. Применение смесителя радиосигналов на основе РТД позволяет повысить чувствительность и помехоустойчивость приемника. Вместе с тем задача обеспечения заданных высоких показателей надёжности СмР на основе РТД на настоящий момент полностью не решена, между тем как требования к гамма-процентной наработке до отказа ($T_{\gamma=0,9999}$) СмР для авиационного приборостроения составляют 6...8 лет, для космической отрасли – 13...15 лет.

Задача достижения указанных значений показателей надёжности СмР может быть решена при системном подходе к этой проблеме, основанном на исследовании деградационных явлений в структуре СмР, определяющих формирование их отказов, с учетом параметров конструкции и технологии изготовления. В конечном итоге это позволит провести выбор конструкторско-технологических методов и средств повышения надёжности СмР на основе РТД.

Предварительные исследования, проведённые в МГТУ им. Н.Э. Баумана, показали, что для СмР основным типом отказов являются постепенные отказы, которые в свою очередь обусловлены процессами старения элементов РТД. В соответствии со структурой РТД старение происходит в результате деградационных явлений, обусловленных диффузионным размытием в AlAs/GaAs резонансно-туннельной структуре (РТС), приконтактных слоях (слои Si-легированного GaAs) и омических контактах (ОК). Интенсивность отказов зависит от параметров РТГС, технологии ее изготовления и от конструкции и технологии изготовления ОК.

В связи с этим представляется актуальной, имеющей важное научное и практическое значение работа, направленная на обеспечение заданного уровня надёжности смесителей радиосигналов на резонансно-туннельных диодах. Ее выполнение предполагает проведение теоретических и экспериментальных исследований деградации показателей назначения СмР на основе AlAs/GaAs РТД.

Цель диссертационной работы

Целью работы является повышение надёжности смесителей радиосигналов на основе резонансно-туннельных диодов.

Основные задачи исследования

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Исследование закономерностей формирования постепенных отказов смесителей радиосигналов на основе РТД;
2. Исследование влияния деградационных явлений в РТС, приконтактных областях и омических контактах РТД на выходные электрические параметры СМР;
3. Исследование влияния технологического процесса изготовления на модификацию свойств резонансно-туннельной гетероструктуры и омических контактов смесительных РТД с использованием методов ИК-спектральной эллипсометрии (ИК-СЭ) и ускоренного старения полупроводниковых устройств;
4. Разработка методик технической диагностики РТД с использованием методов ИК-СЭ и ускоренного старения полупроводниковых устройств и методики прогнозирования надежности смесителей радиосигналов на основе РТД;
5. Выбор конструкторско-технологических методов и средств повышения надежности смесителей радиосигналов на основе AlAs/GaAs РТД.

Научная новизна

Новыми научными результатами, полученными автором, являются:

1. Определена физическая сущность процессов, определяющих формирование постепенных отказов смесителей радиосигналов на основе РТД, в основе которых лежат особенности протекания деградационных процессов как в наноразмерных полупроводниковых AlAs/GaAs резонансно-туннельных гетероструктурах, так и омических контактах резонансно-туннельных диодов;

2. Разработана математическая модель деградационных процессов в РТД, позволяющая проводить оценку дрейфа ВАХ РТД в процессе эксплуатации и связанного с этим изменения выходных электрических параметров СМР, и, соответственно, прогнозировать надежность СМР на основе РТД при различных конструкторско-технологических решениях изделия. Модель формализована в виде двух частных моделей: математической модели деградации РТГС, определяемой диффузией Al и Si в РТГС, и математической модели деградации контактного сопротивления ОК, связанной с диффузионным размытием структуры омических контактов.

3. Разработан комплекс методик технической диагностики РТД, позволяющий оценить качество их изготовления. Он включает в себя методику диагностики качества наноразмерных AlAs/GaAs РТГС с использованием метода ИК-СЭ, позволяющую определять коэффициенты диффузии Al и Si в GaAs, и методику оценки изменения ВАХ РТД под действием деградационных процессов в его структуре, позволяющую определять зависимость контактного сопротивления ОК от времени и температуры;

4. Разработана методика прогнозирования надежности СМР на основе РТД, включающая в себя моделирование деградационных процессов в РТД, его ВАХ и выходных электрических характеристик смесителя радиосигналов на основе РТД. Методика позволяет выбирать рациональные конструкторско-технологические решения, обеспечивающие заданный уровень надежности СМР на основе РТД.

Практическая ценность работы

1. Разработанный программно-расчетный комплекс dif2RTD позволяет моделировать ВАХ РТД с учетом диффузионных процессов в AlAs/GaAs РТГС и омических контактах. На основе dif2RTD на этапе конструкторско-технологического проектирования проводится выбор рациональных параметров, а именно толщин и химического состава как РТС, так и приконтактных областей с целью улучшения показателей надежности РТД и смесителей радиосигналов на их основе;

2. Разработан алгоритм выбора вариантов исполнения омических контактов смесительных РТД с целью поиска ОК с минимальной скоростью термической

деградации при эксплуатации смесительных AlAs/GaAs ПТД; выбор проводится на этапе отработки технологии изготовления СМР и реализуется на базе методики оценки изменения ВАХ ПТД под действием деградационных процессов в его структуре;

3. Разработан алгоритм выбора режимов технологической операции молекулярно-лучевой эпитаксии с учетом технологических особенностей оборудования на этапе отработки технологии изготовления смесительных ПТД с целью минимизации деградации AlAs/GaAs ПТД в процессе изготовления и эксплуатации СМР; выбор реализуется с применением методики диагностики качества наноразмерных AlAs/GaAs резонансно-туннельных гетероструктур на основе ИК-СЭ;

4. Разработана технологическая операция контроля качества изготовления наноразмерных AlAs/GaAs ПТГС на основе ИК-СЭ (на базе разработанной автором методики), которая позволяет повысить надежность СМР на основе ПТД;

5. Разработана технологическая операция селекции смесительных AlAs/GaAs ПТД (на базе разработанной автором методики), которая позволяет в рамках технологического цикла производства смесителей радиосигналов определять численные значения как индивидуальной, так и групповой надёжности ПТД и СМР на их основе, а также выполнять селекцию образцов по степени их надежности.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель деградационных процессов в ПТД, состоящая из суперпозиции моделей диффузии Al и Si в ПТС и приконтактных областях и деградации контактного сопротивления ОК;

2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований формирования показателей надежности смесителей радиосигналов на основе ПТД с использованием методов ИК-СЭ и ускоренного старения полупроводниковых устройств, в том числе, экспериментально определенные численные характеристики основных деградационных процессов, происходящих в структуре СМР на основе ПТД (активационные параметры диффузии Al и Si в ПТС и приконтактных областях, а также зависимость контактного сопротивления AuGeNi ОК от времени и температуры);

3. Комплекс методик технической диагностики ПТД, позволяющий оценить качество их изготовления, включает в себя методику диагностики качества наноразмерных AlAs/GaAs ПТГС на основе ИК-СЭ и методику оценки изменения ВАХ ПТД под действием деградационных процессов в его структуре;

4. Методика прогнозирования надежности смесителей радиосигналов на основе ПТД, которая включает в себя моделирование деградационных процессов в ПТД, его ВАХ и выходных электрических характеристик смесителя радиосигналов на основе ПТД;

5. Конструкторско-технологические методы и средства повышения надежности смесителей радиосигналов на основе AlAs/GaAs резонансно-туннельных диодов:

- Алгоритм выбора режимов технологической операции МЛЭ на базе методики диагностики качества наноразмерных AlAs/GaAs резонансно-туннельных гетероструктур на основе ИК-спектральной эллипсометрии;
- Алгоритм выбора вариантов исполнения омических контактов смесительных ПТД на базе методики оценки изменения ВАХ ПТД под действием деградационных процессов в его структуре;
- Технологическая операция контроля качества изготовления наноразмерных AlAs/GaAs резонансно-туннельных гетероструктур на основе ИК-СЭ;
- Технологическая операция селекции смесительных AlAs/GaAs ПТД;
- Рекомендации по изменению параметров конструкции наноразмерной AlAs/GaAs ПТГС для повышения надёжности смесителей радиосигналов на основе ПТД.

Методы исследования. В работе использовались фундаментальные положения технологии приборостроения, технологии радиотехнических средств, физических основ микроэлектроники, физики твёрдого тела. Экспериментальные исследования проводились по специально разработанным методикам с использованием ИК-спектрального эллипсометра, микрозондового стенда, измерительного СВЧ-стенда и др. спец. оборудования.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов, представленных в диссертационной работе автором, подтверждена результатами экспериментальных исследований деградационных процессов в наноразмерных AlAs/GaAs РТГС методом ИК-СЭ, измерений СВЧ-параметров СмР и ВАХ РТД, применением методов Цу-Есаки и матриц переноса для расчета ВАХ РТД, методов гармонического баланса и рядов Вольтера для моделирования параметров СмР, а также практическим использованием полученных результатов в производственных условиях.

Личный вклад автора. Все результаты диссертационной работы получены лично автором или при его непосредственном участии в результате проведения экспериментальных и расчетных работ. Во всех необходимых случаях заимствования чужих результатов в диссертации приведены ссылки на литературные источники.

Реализация и внедрение результатов работы. Внедрение и промышленная апробация результатов работы осуществлялась на ФГУП ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга г. Москва, а также в НИИ РЛ и УИЦ НТ НМСТ МГТУ им. Н.Э. Баумана, что подтверждено актами о внедрении.

Апробация результатов работы. Вошедшие в диссертацию результаты докладывались и обсуждались на 11 международных и всероссийских конференциях, симпозиумах и форумах.

Публикации. Основное содержание работы отражено в 14 публикациях, из них в журналах из перечня ВАК РФ – 8.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов, списка используемой литературы и приложений. Содержит 241 страницу, в том числе 155 иллюстраций и 8 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована цель и задачи работы, показана ее актуальность, сформулирована научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Указаны состав и структура диссертационной работы.

Глава 1. Проблемы обеспечения надежности при производстве смесителей радиосигналов на основе резонансно-туннельных диодов

В первой части главы рассмотрена перспективность применения РТД в нелинейных преобразователях радиосигналов.

К основным характеристикам смесителя радиосигналов относятся: потери преобразования (L), коэффициент стоячей волны, точка 1 дБ компрессии (P_1), точка пересечения продуктов интермодуляции 3-го порядка (IP_3), коэффициент шума. Уровень и количество интермодуляционных составляющих во многом зависят от формы ВАХ элемента, на основе которого выполнен СмР. Отмечено, что существующие СмР традиционно построены на основе диода с барьером Шоттки (ДБШ), которые имеют экспоненциальную форму ВАХ.

Одним из путей улучшения качества СмР является применение в качестве нелинейного элемента РТД на базе наноразмерных AlAs/GaAs РТГС. Изменяя параметры слоёв гетероструктуры (толщину, химический состав), можно управлять формой ВАХ и создавать диод с оптимальной для конкретного вида нелинейного преобразования

формой ВАХ. Малое время туннелирования электронов ($\sim 1 \cdot 10^{-14}$ с) обеспечивает предельно высокое быстродействие диода и подавление дробовых шумов. Реализация более пологой ВАХ РТД по сравнению с экспоненциальной ВАХ ДБШ способствует уменьшению амплитуд паразитных составляющих в спектре выходного сигнала смесителя. Это позволяет снизить уровень искажений сигналов, уменьшить влияние побочных каналов приема и уровень преобразованных шумов.

Таким образом, применение в качестве нелинейного элемента РТД с поперечным токопереносом на базе наноразмерных AlAs/GaAs РТГС перспективно. В данной области известны работы, проводимые Шашуриным В.Д., Ивановым Ю.А., Малышевым К.В., Мешковым С.А., Федорковой Н.В., Хныкиной С.В., Ветровой Н.А., Георгиевским А.М., Грозовым Д.В., Алкеевым Н.В., Esaki L. (Япония), Tsu R. (Япония), Chang C.A. (Япония), Brown E.R. (США), Parker C.D. (США) и рядом других авторов.

Во второй части главы проведен анализ конструкций микро- и нанoeлектронных диодных смесителей СВЧ-радиосигналов и технологий их производства. В настоящее время конструктивно данные СМР реализуются в виде гибридной или монолитной интегральной схемы. Их конструкция включает в себя подложку, на которой реализуется интегральная схема, расположенные на ней пассивные элементы и, собственно, РТД.

Форма ВАХ РТД определяется главным образом условиями токопереноса в РТС, сопротивлением приконтактной области полупроводника R_{n-n+} , сопротивлением R_c ОК. Выращивание наноразмерной AlAs/GaAs РТГС с заданной формой ВАХ под конкретный тип преобразователя радиосигналов реализуется на основе технологии МЛЭ при температуре от 600 до 650 °С, низкотемпературной МЛЭ (НТ-МЛЭ) при температуре от 150 до 400 °С, либо газофазной эпитаксии (ГФЭ). Технологический процесс изготовления AuGeNi ОК состоит из следующих этапов: последовательное нанесение слоев Au-Ge, Ni и Au, последующий отжиг структуры. Затем проводится изготовление пассивных элементов (микрополосков, сосредоточенных элементов и т.д.), формирование контактов, реализация межсоединений, корпусирование и т.д.

Третья часть главы посвящена проблеме достижения заданной надежности СМР на основе РТД. Исследования, проведенные в МГТУ им. Н.Э. Баумана, показали, что определяющим узлом с точки зрения надежности смесителя является РТД [Шашурин В.Д., Хныкина С.В., Ветрова Н.А.]. Установлено, что доля отказов пассивных элементов СМР мала, а доминируют постепенные отказы РТД. В соответствии со структурой РТД постепенные отказы происходят в результате деградиционных явлений, обусловленных диффузионным размытием, в AlAs/GaAs РТС, приконтактных слоях и ОК. Интенсивность отказов зависит от параметров резонансно-туннельных гетероструктур, технологии ее изготовления и от конструкции и технологии изготовления омических контактов. При этом анализ литературных данных по коэффициентам диффузии (D) Al и Si в GaAs показал, что они существенно отличаются друг от друга как энергией активации диффузии E_a (3,50 ... 4,98 эВ), так и предэкспоненциальным множителем D_0 ($1,7 \cdot 10^{-1}$... $5,2 \cdot 10^3$ см²/с) [Tan T.Y., Yu S., Bracht H., Wee S.F., Wang L., Murray J.J., Mei P. и др.]. Эти коэффициенты диффузии относятся к РТГС, выращенным методом МЛЭ при температурах от 600 до 650 °С. Данных о количественных характеристиках термической стойкости AuGeNi омических контактов в литературе найти не удалось.

В данных условиях актуальной представляется задача исследования закономерностей формирования отказов СМР на основе РТД. Она включает теоретические исследования влияния на выходные электрические параметры СМР деградиционных явлений в РТС, приконтактных областях и ОК, а также экспериментальные исследования деградации показателей назначения СМР на основе

РТД с использованием методов ИК-СЭ и ускоренного старения полупроводниковых устройств. Проведение данных исследований позволит разработать методику прогнозирования надежности СМР на основе РТД и осуществить выбор конструкторско-технологических методов повышения надежности СМР на основе AlAs/GaAs РТД.

Глава 2. Теоретические исследования влияния деградационных явлений в структуре РТД и погрешностей его изготовления на выходные электрические параметры смесителя радиосигналов

В первой части главы проведено исследование влияния диффузионных процессов в наноразмерных AlAs/GaAs РТГС и контактного сопротивления AuGeNi омических контактов на ВАХ РТД и выходные электрические параметры СМР.

Основным механизмом диффузии Al и Si в GaAs является диффузия по вакансиям галлия V_{Ga} . Это связано с тем, что атомы Al и Si имеют сходные массы и размеры и располагаются в подрешетке галлия (при степенях легирования менее $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$).

Основной количественной характеристикой скорости диффузионных процессов является коэффициент диффузии D . С учетом эффекта Ферми получено соотношение:

$$D_{Al, Si}(n) = D_{Al, Si}(n_i) \cdot \left(\frac{n}{n_i}\right)^3, \quad (1)$$

где $D_{Al, Si}(n)$, $D_{Al, Si}(n_i)$ – коэффициенты диффузии Al и Si в n -легированном и собственном GaAs; n и n_i – концентрации электронов в зоне проводимости и собственных носителей заряда, см^{-3} .

В качестве объекта моделирования был выбран субгармонический смеситель (СГСМ). Основным достоинством СГСМ является работа на комбинационной составляющей вида: $f_{\text{пл}} = 2 \cdot f_r - f_c$. Это позволяет уменьшить частоту гетеродина в два раза и понизить влияние шумов гетеродина, за счет того, что для них требуется меньшая мощность гетеродина (до 10 раз по сравнению с обычными смесителями). Кроме того, общее число элементов в СГСМ может быть уменьшено, обеспечивая большую надежность и стабильность характеристик. Расчет диффузионных процессов в РТС и приконтактных областях и моделирование ВАХ РТД реализованы в программно-расчетном комплексе dif2RTD, расчёт выходных электрических параметров смесителя проводился в Microwave Office.

Зависимость контактного сопротивления R_c AuGeNi омических контактов от времени и температуры может быть описана следующим образом:

$$R_c = R_{c0} + \gamma \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{2kT}\right) \cdot \sqrt{t}, \quad (2)$$

где R_{c0} – контактное сопротивление сразу после изготовления, Ом; γ – коэффициент, зависящий от конструкции и технологии изготовления омических контактов, $\text{Ом} \cdot \text{с}^{-0.5}$; k – постоянная Больцмана; T – температура, К; t – время, с.

Сопротивление приконтактных областей R_{n-n+} , представляющих собой слои арсенида галлия со степенью легирования кремнием от $7 \cdot 10^{16}$ до $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, слабо меняется в результате диффузии, поскольку перераспределение кремния в данных слоях не оказывает существенного влияния на суммарное сопротивление приконтактной области. Коэффициенты диффузии Al и Si показывают качество изготовления AlAs/GaAs РТГС. Коэффициент γ отражает скорость диффузионной деградации и соответствующее качество омических контактов, зависящее от их конструкции и технологии изготовления.

На первом этапе данных исследований была проведена оценка влияния диффузионных процессов в наноразмерных AlAs/GaAs РТС на ВАХ РТД и выходные электрические параметры СМР (Рисунок 1а и 1в). На втором этапе была проведена оценка влияния контактного сопротивления AuGeNi омических контактов (точнее коэффициента γ , определяющего их скорость деградации) на ВАХ РТД и выходные электрические параметры смесителей радиосигналов (Рисунок 1б и 1г).

Во второй части главы проведено исследование влияния технологических погрешностей на форму ВАХ РТД и выходные электрические параметры смесителей радиосигналов. По литературным данным при изготовлении AlAs/GaAs РТГС методом МЛЭ погрешности изготовления по толщине слоев и химическому составу составляют от 1 до 2 %. Фактически это соответствует следующим значениям: погрешность изготовления по толщине ± 2 монослоя и погрешность химического состава, приводящая к изменению высоты барьера на $\pm 0,1$ эВ.

Установлено, что уменьшение толщины и высоты слоя AlAs (барьер) при прочих неизменных характеристиках рассмотренной AlAs/GaAs РТГС влечет за собой значительное увеличение потерь преобразования L , тогда как уменьшение толщины слоя GaAs (яма) сопровождается снижением номинальных значений L и расширением динамического диапазона (увеличением коэффициента 1дБ-компрессии K_{1dB}).

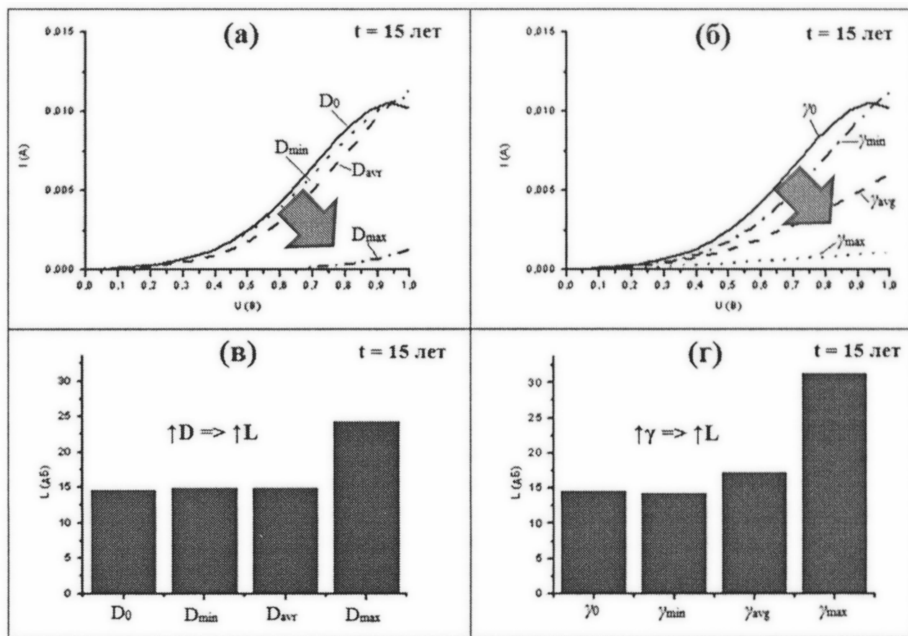


Рисунок 1. ВАХ РТД (а, б) и потери преобразования СГСМ (в, г) в зависимости от коэффициента диффузии Al в GaAs (а, в) и коэффициента γ ОК (б, г)

В третьей части главы проведена оценка влияния на деградацию РТС и приконтактных областей следующих технологических факторов: температур выращивания и отжига. AlAs/GaAs РТГС могут быть изготовлены методом стандартной МЛЭ при температуре подложки 600°C с последующим отжигом при температуре 800°C в течение 30 с, а также методом НТ-МЛЭ при температуре подложки от 150 до

400 °С. Выявлено, что концентрация дефектов в GaAs ГС, выращенных методом стандартной МЛЭ, уменьшается примерно в 100 раз в результате проведения отжига при температуре 800 °С. Похожая ситуация также характерна для GaAs ГС, выращенных методом НТ-МЛЭ, в этом случае концентрация дефектов уменьшается с $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ до $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. При этом концентрация дефектов в AlAs/GaAs РТГС, выращенных методом стандартной МЛЭ, примерно в $1 \cdot 10^5$ раз меньше, чем в выращенных методом НТ-МЛЭ.

Таким образом, в данной главе раскрыты особенности закономерностей формирования постепенных отказов СмР на основе РТД, в основе которых лежат деградационные процессы в структуре РТД: диффузия Al и Si в РТГС (происходит преимущественно по отрицательно заряженным вакансиям галлия третьей степени) и диффузионное размытие структуры ОК. Определено, что диффузионные процессы в наноразмерных AlAs/GaAs РТС и AuGeNi ОК оказывают существенное влияние на изменение формы ВАХ РТД, выходные электрические параметры и, соответственно, надежность СмР. Показано, что в зависимости от технологических особенностей изготовления коэффициенты диффузии Al и Si в GaAs существенно отличаются друг от друга. Так температура МЛЭ, а также температура и время проведения отжига являются ключевыми факторами, определяющими концентрацию дефектов в РТС и приконтактных областях и, соответственно, коэффициенты диффузии Al и Si в GaAs. Аналогично от технологии изготовления зависит коэффициент γ ОК. Эти коэффициенты (D и γ) определяют скорость деградации ВАХ РТД и потерь преобразования СмР. Поэтому для оценки влияния технологического процесса изготовления на модификацию свойств РТГС и ОК смесительных РТД требуется определение коэффициентов диффузии Al и Si в GaAs, а также коэффициентов γ , показывающих скорость деградации ОК.

Глава 3. Экспериментальные исследования влияния технологического процесса изготовления на модификацию свойств резонансно-туннельной гетероструктуры и омических контактов смесительных РТД

В первой части главы приведены методики и оборудование для проведения исследований влияния технологического процесса изготовления на модификацию свойств, связанных с интенсивностью диффузионных процессов, AlAs/GaAs РТГС (характеризуется коэффициентами диффузии Al и Si в GaAs) и омических контактов РТД (характеризуется коэффициентом γ ОК).

Методика оценки коэффициентов диффузии структурно состоит из следующих основных этапов: измерение наноразмерных AlAs/GaAs РТГС методом ИК-СЭ до и после термического воздействия, построение эллипсометрической модели, определение профиля распределения Si в резонансно-туннельных гетероструктурах, расчет коэффициентов диффузии исходя из найденного профиля.

Исследование РТГС проводилось на ИК-спектральном эллипсометре IR-VASE компании J.A. Woollam Co., Inc. в диапазоне длин волн от 300 до 3000 см^{-1} при спектральном разрешении 4 см^{-1} и углах падения излучения на образец от 55° до 80° . Эллипсометрические исследования состоят из следующих основных этапов: получение экспериментальных данных (спектры Ψ и Δ), создание эллипсометрической модели (оптические константы и толщины слоев), корректировка параметров модели для получения наилучшего совпадения экспериментальных и сгенерированных на базе этой модели данных, получение требуемых результатов исследования.

Методика определения коэффициента γ ОК включает в себя следующие основные этапы: измерение ВАХ РТД до и после термического воздействия, расчет γ посредством обработки экспериментальных данных по динамике ВАХ РТД. Для измерения ВАХ РТД

использовался микрозондовый стенд, состоящий из микрозондового устройства, источника питания Agilent E3641A и персонального компьютера. Комплекс позволяет измерять ВАХ РТД с точностью по напряжению $\Delta U = \pm 1$ мВ и току $\Delta I = \pm 10$ мкА.

Термическое воздействие на смесительные РТД и AlAs/GaAs РТГС было реализовано с помощью электропечи сопротивления ЧОЛ 6/11 (диапазон температур от 50 до 1150 °С с точностью ± 5 °С). При этом температура и длительность отжига рассчитывались с учетом степени легирования и данных о физически допустимых температурах для конструкции радиоэлектронной аппаратуры.

Во второй части главы приведены результаты обработки методики исследований методом ИК-СЭ на IR-VASE. Обработка проводилась с использованием наноразмерных модельных органических и металлоорганических гетероструктур.

Третья часть главы посвящена экспериментальным исследованиям влияния параметров технологического процесса изготовления наноразмерных AlAs/GaAs РТГС методом МЛЭ на скорость деградационных процессов в этих структурах, определяемую коэффициентами диффузии Al и Si в GaAs. В основе данных экспериментальных исследований лежат исследования методом ИК-СЭ двух наноразмерных гетероструктур, отличающихся температурой подложки при эпитаксиальном росте:

- GaAs (20 нм) / n-GaAs ($n_{Si} = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, 100 нм) / GaAs (300 нм) / GaAs (подложка 450 мкм) – ГС № 1 (температура МЛЭ 650 °С);
- n-GaAs ($n_{Si} = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, 100 нм) / n-GaAs ($n_{Si} = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, 30 нм) / GaAs (1,5 нм) / AlAs (1,7 нм) / GaAs (4,5 нм) / AlAs (3,0 нм) / GaAs (10,0 нм) / n-GaAs ($n_{Si} = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, 30 нм) / n-GaAs ($n_{Si} = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, 100 нм) / GaAs (подложка 450 мкм) – ГС № 2 (температура МЛЭ 600 °С).

Термическое воздействие на ГС № 1 проводилось при температуре 530 °С, давлении $p = 10^{-4}$ Па в течение 2 ч. Для ГС № 2 оно проводилось при температуре 300 °С в течение 4, 6, 8 и 10 ч (суммарное время отжига 28 ч) в воздушной среде.

Построение эллипсометрических моделей исследуемых гетероструктур в совокупности с анализом выявленных изменений эллипсометрических параметров Ψ и Δ до и после термических испытаний (Рисунок 2) позволило выявить диффузионное размытие слоев, входящих в состав рассматриваемых ГС. Исходя из литературных данных энергия активации диффузии Al и Si в GaAs была выбрана равной 3,5 эВ (2). На основе этого были определены предэкспоненциальные множители (D_0) для исследуемых гетероструктур. Для ГС № 1 D_0 оказался равен $0,17 \text{ см}^2/\text{с}$, для ГС № 2 – $0,22 \text{ см}^2/\text{с}$. Предэкспоненциальные множители отличаются друг от друга на 30 %. Это свидетельствует о том, что технологические параметры (в данном случае температура МЛЭ) влияют на качество изготовления (коэффициент диффузии) РТГС.

В четвертой части главы приведены результаты экспериментальных исследований влияния параметров конструкции и технологии изготовления AuGeNi омических контактов РТД на скорость их диффузионной деградации. В ходе этого были проведены исследования двух партий РТД, отличающихся как параметрами конструкции, так и технологией изготовления. Партия № 1 включала в себя двадцать РТД, партия № 2 – тридцать два. Термическое воздействие на РТД проводилось при температуре 300 °С в течение 150 ч для партии № 1 и в течение 1, 2, 5, 9 и 10 ч (суммарное время термического воздействия 27 ч) для партии № 2. В результате для обеих партий были получены ВАХ РТД до и после термических воздействий и затем проведена их статистическая обработка. На рисунке 3 приведены усредненные по партиям экспериментальные ВАХ. Данные результаты позволили определить коэффициент γ , который отражает скорость

диффузионной деградации омических контактов и входит в выражение (2) зависимости контактного сопротивления AuGeNi OK от времени и температуры. Для партии № 1 коэффициент γ оказался равен $408,2 \text{ Ом/с}^{0,5}$, а для партии № 2 – $\gamma = 25 \text{ Ом/с}^{0,5}$.

Коэффициенты γ , показывающие скорость деградации ОК, отличаются более чем в 16 раз. Таким образом, можно сделать вывод о том, что коэффициент γ чувствителен к изменению конструкции и технологии изготовления ОК. Опираясь на результаты теоретических исследований (глава 2) показано, что диффузионные процессы в омических контактах РТД оказывают существенное влияние на изменение формы ВАХ РТД, выходные электрические параметры и, соответственно, надежность СМР.

Верхний шероховатый слой	24,9 ± 2,0 нм
n-GaAs сильнолегированный Si ($5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$)	100,3 ± 1,7 нм
Градиентный слой	0 нм
n-GaAs легированный Si ($2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$)	30,0 нм
Арсенид галлия GaAs (слейсер)	1,5 нм
Арсенид алюминия AlAs (барьер)	1,7 нм
Арсенид галлия GaAs (яма)	4,5 нм
Арсенид алюминия AlAs (барьер)	3,0 нм
Арсенид галлия GaAs (слейсер)	10,0 нм
n-GaAs легированный Si ($2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$)	30,0 нм
Градиентный слой	0 нм
n-GaAs сильнолегированный Si ($5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$)	1005,0 ± 3,0 нм
Градиентный слой	0 нм
Подложка GaAs	0,35 мм
Нижний шероховатый слой	90,5 ± 10,0 нм

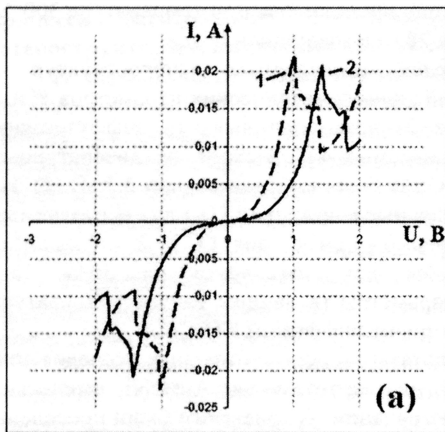
(а)



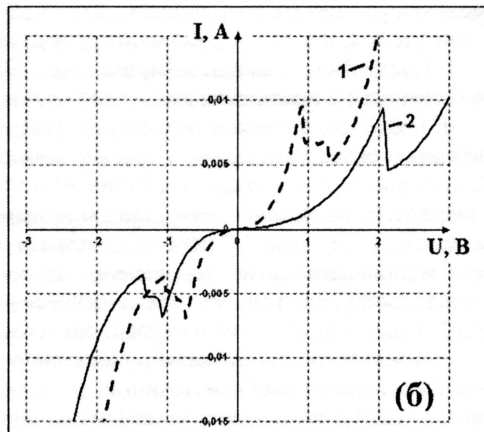
Верхний шероховатый слой	15,9 ± 2,1 нм
n-GaAs сильнолегированный Si ($5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$)	103,4 ± 1,6 нм
Градиентный слой	6,7 ± 1,5 нм
n-GaAs легированный Si ($2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$)	30,0 нм
Арсенид галлия GaAs (слейсер)	1,5 нм
Арсенид алюминия AlAs (барьер)	1,7 нм
Арсенид галлия GaAs (яма)	4,5 нм
Арсенид алюминия AlAs (барьер)	3,0 нм
Арсенид галлия GaAs (слейсер)	10,0 нм
n-GaAs легированный Si ($2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$)	30,0 нм
Градиентный слой	6,9 ± 1,8 нм
n-GaAs сильнолегированный Si ($5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$)	991,2 ± 3,6 нм
Градиентный слой	7,1 ± 1,9 нм
Подложка GaAs	0,35 мм
Нижний шероховатый слой	74,9 ± 10,0 нм

(б)

Рисунок 2. Эллипсометрические модели гетероструктуры № 2 до (а) и после 28 часов термического воздействия (б)



(а)



(б)

Рисунок 3. Экспериментальные ВАХ РТД партии № 1 (а) и № 2 (б) до и после термических испытаний (1 – до, 2 – после 150 (а) и 27 (б) ч)

Исходя из полученных численных значений коэффициентов диффузии Al и Si в GaAs и коэффициента γ ОК было определено их влияние на выходные электрические характеристики СГСМ на основе РТД и, соответственно, проведена оценка их надежности. Установлено, что изменение D на 30 % незначительно сказывается на надежности приборов (теоретически рассчитано, что средняя наработка до отказа СГСМ

изменится на 0,5 %). В свою очередь отличие коэффициентов у ОК более чем в 16 раз (25 и 408,2 Ом/с^{0,5}) приводит к снижению надежности СГСМ на основе РТД в ~ 2,5 раза.

Таким образом, было проведено исследование значимости технологического процесса изготовления на модификацию свойств РТГС и омических контактов смесительных РТД: определены численные характеристики основных деградационных процессов – активационные параметры диффузии Al и Si в РТС и приконтактных областях, а также зависимость сопротивления AuGeNi омических контактов от времени и температуры. Это позволяет перейти к разработке методик технической диагностики РТГС и РТД и методики прогнозирования надежности РТД и СМР на их основе.

Глава 4. Разработка методик технической диагностики и прогнозирования надежности РТД и смесителей радиосигналов на их основе

Первая часть главы посвящена разработке программно-расчетного комплекса для оценки динамики дрейфа ВАХ РТД в результате деградационных процессов в AlAs/GaAs РТГС и омических контактах РТД и численного определения надежности РТД.

Разработанный программно-расчетный комплекс dif2RTD позволяет:

- Моделировать ВАХ РТД с учетом диффузионных процессов в AlAs/GaAs РТГС и омических контактах;
- Исследовать влияние деградационных процессов в AlAs/GaAs РТГС и омических контактах на ВАХ РТД;
- Прогнозировать эксплуатационную надежность РТД.

Структурно программно-расчетный комплекс состоит из трёх модулей:

- Модуль численного моделирования диффузионных процессов в AlAs/GaAs РТГС;
- Модуль численного моделирования деградации AuGeNi омических контактов;
- Модуль численного моделирования ВАХ РТД.

Программно-расчетный комплекс позволяет учесть технологические особенности изготовления РТГС (температуру МЛЭ, температуру и время термических отжигов после МЛЭ и при изготовлении ОК), условия эксплуатации устройства, влияние термического отжига РТГС при ее изготовлении на концентрацию дефектов, деградацию ОК при эксплуатации и деградацию РТС в результате температурной диффузии.

Экспериментальная проверка точности моделирования dif2RTD была осуществлена путем моделирования ВАХ РТД с рассмотренной ранее структурой и сравнения полученных данных с экспериментально измеренными ВАХ РТД. Температура (300 °С) и время температурного воздействия (1, 3, 8, 17 и 27 часов) также были взяты идентичными. Видно, что экспериментальные и расчетные ВАХ РТД хорошо согласуются между собой (Рисунок 4).

Во второй части главы приведены результаты экспериментальных исследований параметров СМР. Показано, что программа Microwave Office может применяться для моделирования выходных электрических параметров СМР на основе РТД, поскольку расчетные и экспериментальные данные имеют хорошую степень совпадения, причем лучшее приближение к эксперименту обеспечивает метод гармонического баланса. Следовательно, ВАХ РТД, полученные с помощью комплекса dif2RTD, могут быть переданы в Microwave Office для моделирования выходных параметров СМР.

В третьей части главы описана методика диагностики качества наноразмерных AlAs/GaAs РТГС на основе ИК-СЭ. В главе 3 было показано, что метод ИК-СЭ «чувствует» отличия в качестве изготовления резонансно-туннельных гетероструктур при различных температурах выращивания и, соответственно, может применяться для контроля их качества. Оценка качества РТГС (с точки зрения диффузионной деградации)

проводится исходя из величины коэффициентов диффузии Al и Si в GaAs. Структурная схема методики представлена на рисунке 5а.

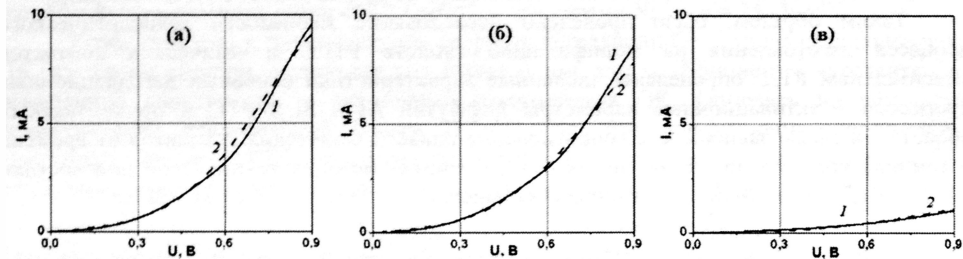


Рисунок 4. Экспериментальные (1) и расчетные (2) ВАХ РТД до (а), после 8 (б) и 27 (в) часов термического воздействия

В четвертой части главы описана методика оценки изменения ВАХ РТД под действием деградационных процессов в его структуре. Методика применяется для определения коэффициента γ , отражающего скорость диффузионной деградации ОК и позволяющего рассчитать зависимость контактного сопротивления РТД от времени и температуры. Структурная схема методики представлена на рисунке 5б.

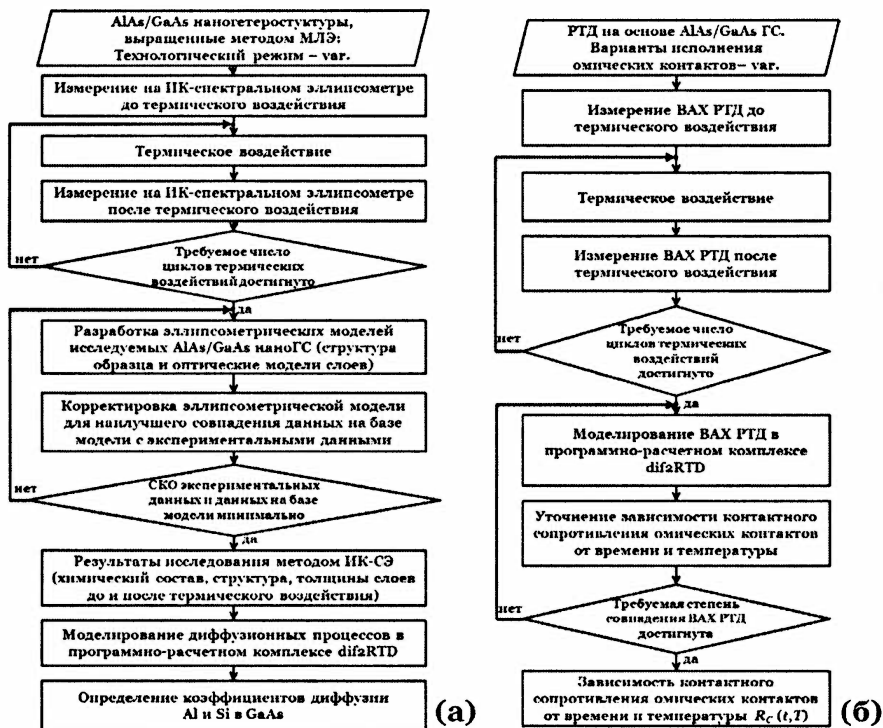


Рисунок 5. Структурная схема методик диагностики качества наноразмерных AlAs/GaAs РТГС на основе ИК-СЭ (а) и оценки изменения ВАХ РТД под действием деградационных процессов (б)

Пятая часть главы посвящена разработке методики прогнозирования надежности СМР на основе РТД в результате диффузионных процессов в РТС, приконтактных областях и омических контактах. Данная методика разработана на базе экспериментально определенных численных характеристик основных деградационных процессов, происходящих в структуре СМР на основе РТД, и позволяет прогнозировать надежность РТД и смесителей радиосигналов на их основе. Ее структурная схема представлена на рисунке 6.



Рисунок 6. Структурная схема методики прогнозирования надежности смесителей радиосигналов на основе AlAs/GaAs РТД

Таким образом, в данной главе разработаны методики технической диагностики: методика диагностики качества наноразмерных AlAs/GaAs РТГС на основе ИК-СЭ и методика оценки изменения ВАХ РТД под действием деградационных процессов в его структуре, а также методика прогнозирования надежности СМР на основе РТД. Комбинация методик позволяет разработать конструкторско-технологические методы и средства повышения надежности РТД и СМР на их основе на различных этапах технологического цикла изготовления смесителей радиосигналов.

Глава 5. Выбор конструкторско-технологических методов и средств повышения надежности смесителей радиосигналов на основе AlAs/GaAs РТД

В первой части главы описано проведение выбора режимов технологической операции МЛЭ на основе методики диагностики качества наноразмерных AlAs/GaAs РТГС на основе ИК-СЭ. Выбор проводится на этапе отработки технологии изготовления смесительных AlAs/GaAs РТД с целью минимизации деструкции AlAs/GaAs РТС на этапах изготовления и эксплуатации смесителей радиосигналов и структурно состоит из следующих основных этапов:

- изготовление AlAs/GaAs РТГС при различных технологических режимах МЛЭ;
- диагностика качества наноразмерных AlAs/GaAs РТГС на основе ИК-СЭ;
- выбор AlAs/GaAs РТГС с минимальной деструкцией на этапах изготовления и эксплуатации;
- построение прогноза надежности СМР на базе исследуемых AlAs/GaAs РТГС;
- выбор режимов технологической операции МЛЭ, обеспечивающих требуемую надежность СМР на основе AlAs/GaAs РТГС.

Во второй части главы описано проведение выбора вариантов исполнения омических контактов смесительных РТД на основе методики оценки изменения ВАХ РТД под действием деградационных процессов в его структуре. Выбор проводится на этапе отработки технологии изготовления СМР на основе РТД с целью поиска омических

контактов с минимальной скоростью термической деградации при эксплуатации смесительных AlAs/GaAs РТД и структурно состоит из следующих основных этапов:

- изготовление РТД на основе AlAs/GaAs РТГС с различными вариантами исполнения омических контактов (могут отличаться параметрами конструкции, химическим составом и технологией изготовления);
- исследования изменения ВАХ РТД под действием деградационных процессов в его структуре;
- поиск омических контактов с минимальной скоростью термической деградации;
- построение прогноза надежности смесителя радиосигналов на базе исследуемых РТД;
- выбор варианта исполнения омических контактов смесительных РТД.

Обобщенная схема процесса отработки технологии изготовления смесителей радиосигналов на основе РТД приведена на рисунке 7.

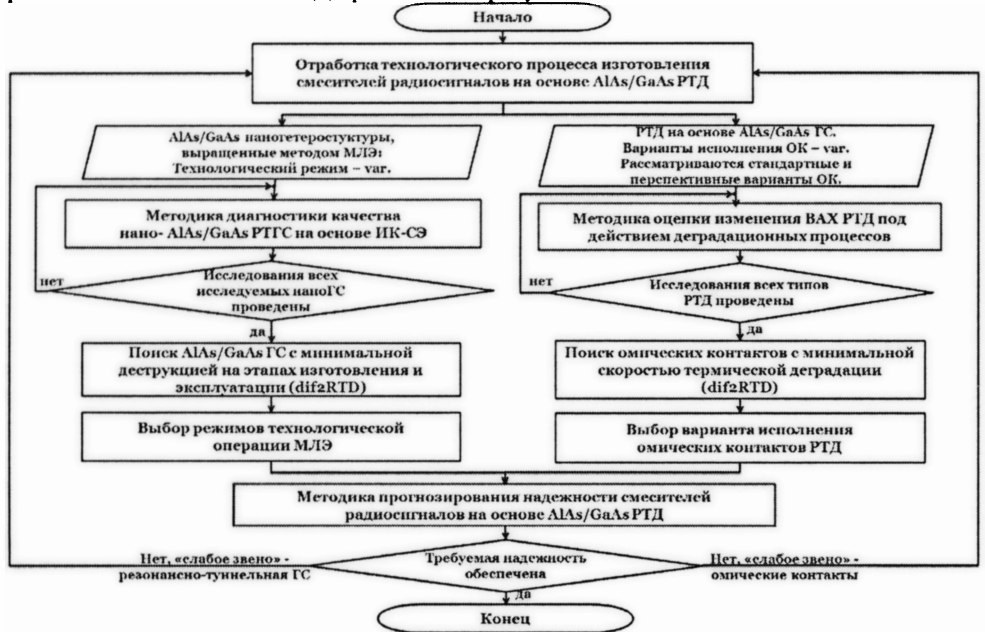


Рисунок 7. Схема отработки технологии изготовления СМР на основе РТД

Методика оценки изменения ВАХ РТД под действием деградационных процессов в его структуре также может применяться при входном контроле качества РТД с целью определения соответствия полученных РТД предъявляемым требованиям по надежности.

В третьей части главы приводится разработка технологической операции контроля качества изготовления наноразмерных AlAs/GaAs РТГС на основе метода ИК-СЭ (Рисунок 8а). Данная технологическая операция позволяет определять численные параметры диффузионных процессов в РТС и приконтактных областях (коэффициенты диффузии Al и Si в GaAs), а также выдавать информацию о необходимости корректировки техпроцесса в случае, если требуемая надежность смесителей радиосигналов на основе AlAs/GaAs РТД не обеспечивается.

В четвертой части главы приводится разработка технологической операции селекции смесительных AlAs/GaAs РТД. В ее основе лежит принцип ускоренного старения изделия за счёт воздействия температурного фактора, а также измерения

изменения ВАХ РТД и выходных параметров СМР на его основе в результате температурных воздействий (Рисунок 8б). Технологическая операция селекции смесительных AlAs/GaAs РТД позволит в рамках технологического цикла производства СМР определять численные значения как индивидуальной, так и групповой надежности РТД и СМР на его основе, а также выполнять селекцию образцов по степени их надежности. Тем самым, на этапе производства обеспечивается надёжность СМР.

В пятой части главы приведены рекомендации по изменению конструктивных параметров наноразмерной AlAs/GaAs РТГС с учетом проведенной диагностики и определенных коэффициентов диффузии с целью повышения надёжности смесителей радиосигналов на основе РТД.

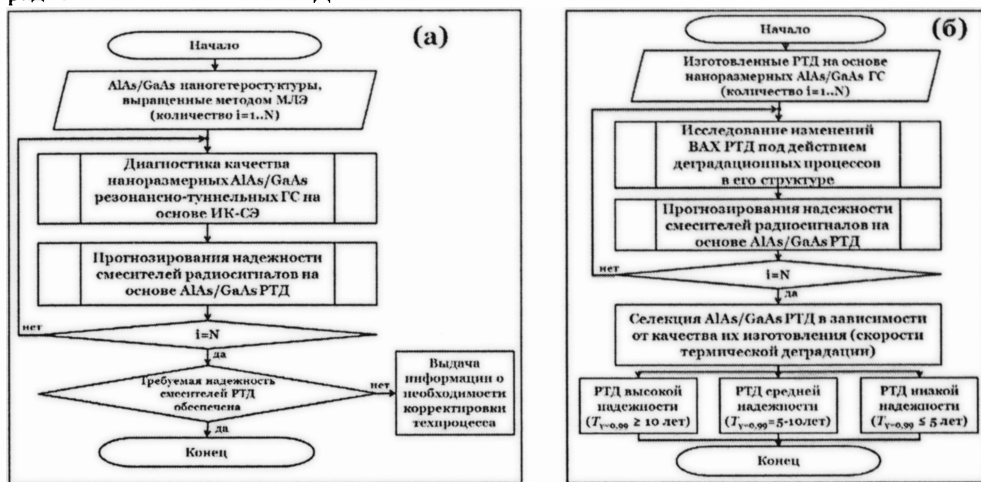


Рисунок 8. Алгоритмы технологических операций контроля качества изготовления наноразмерных AlAs/GaAs РТГС для СМР на основе метода ИК-СЭ (а) и селекции смесительных AlAs/GaAs РТД (б)

В заключение сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы:

1. Установлено, что диффузионные процессы в наноразмерных AlAs/GaAs РТС и омических контактах приводят к изменению формы ВАХ РТД, ухудшению выходных электрических параметров смесителей радиосигналов на основе РТД и, соответственно, постепенному отказу смесителей радиосигналов.

2. Разработана математическая модель деградиционных процессов в РТД, состоящая из суперпозиции двух моделей: математической модели деградации резонансно-туннельной гетероструктуры, связанной с диффузией Al и Si в РТС и приконтактных областях (в ее основе лежит метод конечных элементов), и математической модели деградации контактного сопротивления ОК, связанной с диффузионным размытием структуры ОК (в ее основе лежит разработанная функциональная зависимость контактного сопротивления омических контактов от времени и температуры). Входными данными для моделей являются конструкторско-технологические параметры РТД и условия эксплуатации смесителя радиосигналов.

3. Показана применимость метода ИК-спектральной эллипсометрии для определения коэффициентов диффузии Al и Si в AlAs/GaAs резонансно-туннельных гетероструктурах. Определены активационные параметры диффузии Al и Si в РТС и

приконтактных областях (предэкспоненциальный множитель D_0 лежит в диапазоне от 0,17 до 0,22 см²/с, энергия активации диффузии E_a равна 3,5 эВ).

4. Предложена функциональная зависимость контактного сопротивления R_c омических контактов, которая связывает конструкцию и технологию изготовления омического контакта, а также длительность t и температуру эксплуатации T с изменением R_c . Зависимость $R_c(t, T)$ экспериментально определена для двух партий РТД с AuGeNi омическими контактами (коэффициенты γ омических контактов оказались равны 25 и 408,2 Ом/с^{0.5}).

5. Для обеспечения заданного уровня надежности РТД и смесителей на их основе рекомендовано выбирать рациональные конструкторско-технологические параметры РТС, приконтактных областей и омических контактов на основе разработанной методики прогнозирования надежности РТД и смесителей на их основе. Основными этапами методики является моделирование деградационных процессов в РТД и их влияния на ВАХ РТД в разработанном программно-расчетном комплексе dif2RTD и моделирование выходных электрических характеристик смесителя радиосигналов на основе РТД в Microwave Office.

6. Показано, что коэффициент γ омических контактов и коэффициенты диффузии Al и Si в GaAs могут быть использованы в качестве параметров оптимизации на этапе отработки технологии изготовления РТД и смесителей радиосигналов на их основе. В соответствии с этим разработаны:

- алгоритм выбора вариантов исполнения омических контактов смесительных РТД с целью поиска омических контактов с минимальной скоростью термической деградации при эксплуатации смесительных AlAs/GaAs РТД;
- алгоритм выбора режимов технологической операции МЛЭ с учетом технологических особенностей оборудования с целью минимизации деградации AlAs/GaAs РТС в процессе изготовления и эксплуатации СМР.

7. Предложено оценивать качество изготовления AlAs/GaAs РТД по величинам коэффициентов диффузии Al и Si в GaAs, отражающих интенсивность диффузионных процессов в резонансно-туннельной гетероструктуре, и коэффициента γ , отражающего скорость деградации омических контактов. Исходя из этого, разработаны:

- технологическая операция выборочного контроля качества изготовления наноразмерных AlAs/GaAs резонансно-туннельных гетероструктур на основе ИК-спектральной эллипсометрии, заключающаяся в определении диффузионного размытия слоев РТГС в результате ускоренных испытаний методом ИК-СЭ, и последующем расчете коэффициентов диффузии Al и Si в РТГС;
- технологическая операция селекции смесительных AlAs/GaAs РТД по степени их надежности, в основе которой лежит оценка изменения ВАХ РТД за счёт воздействия температурного фактора и прогнозирование численных значений как индивидуальной, так и групповой надёжности РТД и СМР на их основе.

8. Предложены рекомендации по изменению параметров конструкции наноразмерной AlAs/GaAs РТГС для смесителей радиосигналов. Снижение толщин приконтактных областей до минимальных значений, обеспечивающих сохранение ими заданных функциональных свойств, позволяет сократить время технологической операции выращивания многослойной AlAs/GaAs РТГС и тем самым уменьшить диффузионное размытие Al в РТС и Si в приконтактных областях и повысить надёжность РТД и смесителей радиосигналов на их основе.

Приложение включает материалы, не вошедшие в основные разделы работы.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Макеев М.О., Иванов Ю.А., Мешков С.А. Исследование деградационных явлений в наноразмерных AlAs/GaAs гетероструктурах методом ИК-спектроскопии // Наноинженерия. 2011. № 4. С. 44-48.

2. Исследование гетероструктур методами широкополосной ИК-эллипсометрии-спектроскопии / М.О. Макеев [и др.] // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. Специальный выпуск Наноинженерия. 2010. С. 80-91.

3. Исследование термической деградации AuGeNi омических контактов AlAs/GaAs гетероструктур / М.О. Макеев [и др.] // Наноинженерия. 2012. № 9. DOI: <http://dx.doi.org/10.17073/2012-9-44>

4. Application of the film thickness of a polytetrafluoroethylene layer on a charge / М.О. Макеев [et al.] // High Energy Chemistry. 2012. № 1. DOI: <http://dx.doi.org/10.17073/2012-1-44>

5. Использование средств повышения надежности смесителей радиочастоты для определения толщины слоя образца ПТФЭ // Журнал Радиофизики и электротехники. 2012. № 1. DOI: <http://dx.doi.org/10.17073/2012-1-44>

6. Исследование поверхности ПТФЭ методом ИК-спектроскопии // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. Специальный выпуск Наноинженерия. 2010. С. 80-91.

7. Моделирование характеристик AlAs/GaAs ПТД в режиме прямого тока / М.О. Макеев [и др.] // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. Специальный выпуск Наноинженерия. 2010. С. 80-91.

У2061651

Макеев М.О.
Разработка конструкторско-технологических методов и средств повышения надежности смесителей радиочастоты

0,00

2014

--	--	--

2061651

Возвратите книгу не позже
обозначенного здесь срока

AlAs/GaAs ПТД
// Наука и техника
№ 11. DOI: <http://dx.doi.org/10.17073/2012-11-44>

И.Э. dif2RTD: 61001. 2012.
AlAs/GaAs
инновации.
обращения

констр. образц
http://dx.doi.org/10.17073/2012-1-44
свидет
нано
2013.
02.12.2013

Подписано в печать : 22.08.2014

Объём: 1 п.л.

Тираж: 100 экз.

Отпечатано в типографии «Реглет»

119526, г. Москва, ул. Бауманская, д. 33, стр.1

+7(495)979-98-99, www.reglet.ru