

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
НАУКИ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. П.Н. ЛЕБЕДЕВА  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

САВИНОВ Сергей Александрович

**РЕЗОНАНСНОЕ ТУННЕЛИРОВАНИЕ И ПРОЦЕССЫ  
УСИЛЕНИЯ И ВЫПРЯМЛЕНИЯ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ВОЛН  
В НАНОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва  
2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Мурзин Владимир Николаевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Гавриленко Владимир Изяславович (ИФМ РАН)  
  
кандидат физико-математических наук  
Журавлев Максим Николаевич (МИЭТ)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт радиотехники  
и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Защита состоится 30 марта 2015 года в 12 часов на заседании диссертационного  
совета Д 002.023.03 при ФИАН по адресу: г. Москва, Ленинский проспект, д. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН, с авторефератом – на  
сайте института [www.lebedev.ru](http://www.lebedev.ru).

Автореферат разослан “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 002.023.03  
доктор физико-математических наук,  
профессор

М.А. Казарян

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

Разработка физических принципов усиления, генерации и преобразования электромагнитных волн субтерагерцового и терагерцового (ТГц) диапазона является одной из проблем, определяющей возможности продвижения современной твердотельной электроники в сторону высоких частот и сверхвысокого быстродействия. Широко используемые в настоящее время твердотельные высокочастотные элементы ганновского типа, на основе лавинно-пролетных диодов, диодов Шоттки ограничены частотным порогом в несколько сотен гигагерц [1, 2]. Резонансно-туннельные диодные (РТД) наногетероструктуры свободны от этого ограничения. Простейшим примером таких структур является полупроводниковая система, состоящая из квантовой ямы с двумя потенциальными барьерами [3]. Резонанс в такой системе реализуется при совпадении энергии налетающего на такую структуру электрона с энергией уровня размерного квантования в квантовой яме. РТД обладает исключительно высоким быстродействием, сравнимым с быстродействием сверхпроводниковых приборов на основе эффекта Джозефсона [4], и существенно нелинейной N-образной вольт-амперной характеристикой, обеспечивающей возможность разнообразных функциональных применений РТД в цифровых, аналоговых, оптоэлектронных и других устройствах [5, 6, 7, 8]. Экспериментальная оценка инерционности внутренних электронных процессов в РТД структурах на основе GaAs/AlGaAs и InGaAs/InAlAs соответствует временам порядка и менее 0.1 пс [9, 10, 11]. Гетероструктуры типа InGaAs/AlAs, выращенные на подложке InP, являются более перспективными в этом отношении за счет более высокой подвижности электронов и подавления процессов рассеяния в барьерах [12, 13], что также приводит к более высоким соотношениям «пик-долина» в вольт-амперных характеристиках [14, 15, 16]. К настоящему времени в генераторах на основе InGaAs/AlAs РТД разными научными группами достигнуты рекордные частоты излучения вплоть до одного терагерца и выше [17, 18, 19]. С точки зрения детектирования преимущественное внимание в последнее время уделяется РТД с несколькими квантовыми ямами [20]. В частности, в результате исследований двухъямных РТД с помощью низкочастотных измерений процессов выпрямления при сопоставлении с данными численного моделирования детекторных РТД элементов показано, что такие структуры обладают хорошими нелинейными свойствами и могут

использоваться в качестве детекторов при высоких частотах [21]. Эти результаты свидетельствуют о перспективности применения РТД структур в микроэлектронике и оптоэлектронике суб-ТГц и ТГц диапазона, в особенности с учетом возможностей их монолитной интеграции с транзисторными и другими полупроводниковыми элементами [22, 23, 24]. Вместе с тем, продвижение в сторону сверхвысокого быстродействия, очевидно, сопряжено с необходимостью преодоления целого ряда значительных трудностей, в том числе обусловленных возрастанием энергетических потерь, падением добротности резонаторных систем и рядом других факторов [25].

В этой ситуации актуальное значение приобретает задача адекватного описания высокочастотных свойств РТД с целью нахождения оптимальных конфигураций, структурных и электрофизических параметров РТД, необходимых для создания эффективных генераторов и детекторов в суб-ТГц и ТГц диапазоне частот. Построенная в последние годы квантовая теория когерентного резонансного туннелирования электронов в РТД при взаимодействии с высокочастотным электромагнитным полем [26, 27, 28, 29] позволила по новому подойти к изучению высокочастотных свойств РТД как в области низких частот  $\omega\tau \leq 1$  (обычный классический режим усиления,  $\tau$  - время жизни), так и при высоких частотах, соответствующих условию  $\omega\tau > 1$  («квантовый режим» усиления). Согласно этой теории «квантовый» режим усиления обещает резкое повышение эффективности РТД, причем именно в области суб-ТГц и ТГц частот. Однако недостатком перечисленных работ является использование в них целого ряда приближений, исключающих возможность учета структурных и электрофизических характеристик РТД. Во всех случаях расчеты проводятся для приближенных моделей РТД с дельта-образными барьерами. Инжекция носителей в квантовую яму осуществляется моноэнергетическим пучком и только со стороны эмиттера. Принципиальным моментом является то, что в этой теории не учитывается влияние постоянного электрического поля. Очевидно, что для количественного анализа высокочастотных свойств РТД структур требуется более полная квантовая теория резонансного туннелирования в РТД во внешнем электромагнитном поле, не использующая указанные приближения.

В настоящей работе проведены экспериментальные и теоретические исследования высокочастотных свойств РТД структур на основе построенной квантовой теории резонансного туннелирования в РТД во внешнем электромагнитном поле, учитывающей приложенное к структуре постоянное электрическое поле. Для РТД структур с конечной шириной и высотой барьеров

рассчитана действительная часть высокочастотной проводимости (высокочастотный отклик) с учетом фермиевского распределения электронов по энергиям в эмиттере и коллекторе и влияния на электронные волновые функции в РТД стационарного электрического поля. Проанализированы закономерности высокочастотного отклика в одноямных и двухъямных РТД в зависимости от структурных и электрофизических параметров РТД, частоты и амплитуды переменного поля в условиях приложения к структуре постоянного напряжения. С использованием данной теории проанализированы закономерности процессов выпрямления суб-ТГц и ТГц волн в одноямных и двухъямных РТД. Выполнены экспериментальные исследования по изучению изменений стационарного тока РТД под воздействием слабого и интенсивного электромагнитного поля в РТД с оптимальными структурными и электрофизическими параметрами, выбранными на основе теоретического анализа, в диапазоне суб-ТГц частот. В работе исследовались одноямные и двухъямные РТД различных конфигураций на основе полупроводниковых соединений GaAs/AlAs и InGaAs/AlAs/InP, которые согласно полученным данным обладают наиболее выраженными резонансными свойствами.

## **Цели работы**

1. Анализ высокочастотных свойств РТД наноструктур с квантовыми ямами на основе построенной теории, выявление закономерностей резонансного туннелирования и высокочастотного отклика в условиях взаимодействия СВЧ поля с электронной подсистемой РТД в диапазоне гигагерцовых, суб-ТГц и ТГц частот в зависимости от структурных параметров РТД, распределения электронов в предбарьерных частях структуры и влияния стационарного электрического поля на электронные состояния в РТД.

2. Теоретическое и экспериментальное изучение нелинейных свойств РТД, процессов выпрямления высокочастотного электромагнитного поля в диапазоне суб-ТГц и ТГц частот в структурах с одной и двумя квантовыми ямами, сопоставление детектирующих свойств РТД в зависимости от конфигурации гетероструктур.

3. Разработка диагностических методов контроля и корректировка технологии изготовления РТД наноструктур с целью обеспечения высокого качества интерфейсов и резонансных характеристик РТД наногетероструктур на основе полупроводниковых соединений типа GaAs/AlAs и типа InGaAs/AlAs, выращиваемых на подложке InP.

## **Научная новизна**

1. Показано, что в случае одноямных РТД с узкими барьерами, оптимальных с точки зрения достижения наилучших высокочастотных характеристик в диапазоне суб-ТГц и ТГц частот, реализуется классический режим усиления, при котором энергия квантов СВЧ поля меньше квантовой ширины уровня в яме РТД.

2. Показано, что главные закономерности высокочастотного отклика РТД с двумя квантовыми ямами определяются взаимодействием электронных состояний в соседних ячейках структуры и наличием двух резонансных уровней, верхний из которых оказывается привилегированным, как с точки зрения туннелирования, так и с точки зрения взаимодействия с электромагнитным полем. В двухъямных РТД обнаружены эффекты энергетической фильтрации, узкополосного усиления и возможности плавной перестройки частоты узкополосного усиления в диапазоне терагерцовых частот 1÷5 ТГц посредством варьирования прикладываемого к структуре постоянного напряжения.

3. В результате экспериментальных исследований, выполненных в РТД структурах в суб-ТГц диапазоне частот (0.1-0.2 ТГц), изучены особенности процессов выпрямления высокочастотного поля в РТД, оценено быстродействие РТД элементов и показано, что времена переходных процессов в изготовленных образцах РТД структур не превышают 1 пс. Теоретически показана возможность детектирования суб-ТГц и ТГц волн в двухъямных РТД с оптимально подобранной структурой при нулевом напряжении смещения, превосходящего по чувствительности детектирование в асимметричных одноямных РТД.

## **Научная и практическая значимость работы**

В работе определены оптимальные конфигурации и параметры одноямных и двухъямных РТД гетероструктур, которые могут использоваться в качестве эффективных активных и пассивных элементов для генерации, усиления, преобразования и детектирования суб-ТГц и ТГц излучения.

Обнаруженные в двухъямных РТД эффекты энергетической фильтрации, узкополосного усиления и возможности плавной перестройки частоты узкополосного усиления в области терагерцовых частот открывает перспективы повышения эффективности и создания нового класса усилителей, генераторов, детекторов и других элементов твердотельной микроэлектроники и оптоэлектроники суб-ТГц и ТГц диапазона на основе полупроводниковых резонансно-туннельных наноструктур.

## **Положения, выносимые на защиту**

1. В одноямных РТД с узкими барьерами, оптимальных с точки зрения достижения наилучших высокочастотных характеристик в диапазоне суб-ТГц и ТГц частот, реализуется классический режим усиления, при котором энергия квантов СВЧ поля меньше квантовой ширины уровня в яме РТД.

2. Главные закономерности высокочастотного отклика РТД с двумя квантовыми ямами определяются наличием двух резонансных уровней и преобладающим вкладом межуровневых электронных переходов в соседних ячейках структуры. Верхний резонансный уровень в двухъямной РТД оказывается привилегированным, как с точки зрения туннелирования, так и с точки зрения взаимодействия с электромагнитным излучением, что приводит к резонансному усилению СВЧ поля, при энергии квантов порядка разности энергий резонансных уровней, и возрастанию высокочастотного отклика в сравнении с одноямными РТД.

3. Резонансное взаимодействие электронных состояний в двухъямных РТД приводит к возникновению эффектов энергетической фильтрации, узкополосного усиления и возможности плавной перестройки частоты узкополосного усиления в диапазоне терагерцовых частот (1÷5 ТГц) посредством варьирования прикладываемого к структуре постоянного напряжения.

4. Экспериментально на основе результатов измерений выпрямления суб-ТГц волн в РТД структурах показано, что времена переходных процессов в изготовленных образцах РТД структур не превышают 1 пс. Возникающие под воздействием СВЧ излучения изменения стационарного тока в слабых полях пропорциональны второй производной тока по напряжению, с ростом интенсивности перестают удовлетворять слабо-сигнальному приближению и при больших интенсивностях СВЧ поля определяются особенностями ВАХ в области отрицательной дифференциальной проводимости.

## **Личный вклад автора**

Все изложенные в диссертации результаты получены лично автором либо при его непосредственном участии.

## **Апробация результатов работы**

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах ФИАН, а также на следующих российских и международных конференциях: «Научная сессия НИЯУ МИФИ» (2010 г. и 2012-2014 гг., Москва),

XVI Международном симпозиуме «Нанозфизика и нанозлектроника» (2012 г., Нижний Новгород), Workshop “Semiconductors sources and detectors of THz radiation” (2012 г., Tignes, France), 2-й и 3-й Научно-практических конференциях по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «Мокеровские чтения» (2012 г. и 2013 г., Москва), XII Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы измерений» (2013 г., Москва), Международных конференциях «Микро- и нанозлектроника» (ICMNE) (2012 г. и 2014 г., Москва-Звенигород).

## **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 20 работ, включая 10 статей в реферируемых журналах и 10 публикаций в материалах конференций. Список публикаций приведен в конце автореферата.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Объем диссертации составляет 119 страниц машинописного текста, включая 58 рисунков и 4 таблицы. Список использованной литературы содержит 103 наименования.

## **Содержание работы**

Во **Введении** обоснована актуальность темы исследования, показана её научная новизна, сформулированы цели работы и приведены положения, выносимые на защиту.

В **Главе 1** приводится обзор теоретических и экспериментальных работ по теме диссертации. В параграфе 1.1 обсуждаются результаты экспериментальных исследований быстрогодействия внутренних электронных процессов в РТД структурах, токовых неустойчивостей и процессов генерации суб-ТГц и ТГц излучения, а также изменений стационарного тока в РТД под воздействием внешнего высокочастотного электромагнитного поля. В работах нескольких научных групп данные о быстродействии получены при экспериментальном смешивании излучений разной частоты от нескольких источников, а также в результате измерения изменений стационарных вольт-амперных характеристик РТД структур при сопоставлении этих величин с рассчитанными данными, учитывающими рассогласование импедансов антенн и РТД, емкость мезы РТД и



другие факторы. Согласно этим работам, выполненным при возбуждении излучением с частотами вплоть до 2.5 ТГц [9], 3.3 ТГц [10] и 3.9 ТГц [11], инерционность переходных процессов в РТД соответствует временам порядка и менее 0.1 пс. Генерация СВЧ волн в РТД (18 ТГц) впервые была зарегистрирована при низких температурах, а чуть позже и при комнатной температуре на частоте 200 ТГц с использованием прямоугольных волноводных резонаторов с подвижным поршнем, позволяющим осуществлять регулировку частоты и амплитуды возникающих высокочастотных колебаний [30]. В результате уменьшения поперечных размеров волновода до  $0.3 \times 0.15 \text{ мм}^2$  и подбора структурных параметров РТД максимальная частота генерации, зарегистрированная в такой схеме составила 712 ТГц (мощность  $\sim 0.3 \text{ мкВт}$ ) [31]. Применение планарных технологий позволило интегрировать РТД с более эффективными щелевыми или патч-микрорезонаторными элементами, выполняющими одновременно роль антенн. К настоящему моменту с использованием таких антенн получена генерация в РТД с предельно тонкими барьерами ( $10\text{-}13 \text{ \AA}$ ) и малым диаметром мез ( $\sim 0.2 \text{ мкм}$ ) мощностью  $\sim 1 \text{ мкВт}$  на частотах вплоть до 1.11 ТГц [17], 1.4 ТГц [18] и 1.42 ТГц [19]. Рассмотрены работы по исследованию детектирования и процессов выпрямления электромагнитного излучения в РТД структурах. В самое последнее время преимущественное внимание уделяется не одноямным, а РТД с несколькими квантовыми ямами [20]. В частности, в результате исследований РТД с двумя квантовыми ямами с помощью низкочастотных измерений процессов выпрямления при сопоставлении с данными численного моделирования детекторных РТД элементов показано, что трехбарьерные РТД обладают хорошими нелинейными свойствами и могут использоваться в качестве детекторов при высоких частотах [21].

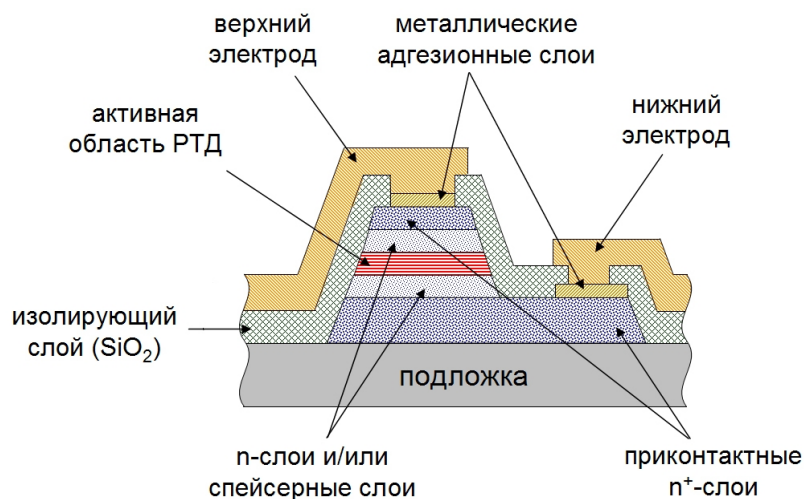
В параграфе 1.2 представлены результаты анализа теоретических работ. Основное внимание уделено циклу публикаций [26-29], посвященному развитию квантовой теории когерентного резонансного туннелирования во внешнем высокочастотном электромагнитном поле. В теории рассматривается приближенная модель РТД с дельта-образными барьерами конечной мощности при моноэнергетической инжекции электронов в квантовую яму. Основным результатом теории является предсказание “квантового” режима усиления/генерации, который может возникать в случае, когда энергия инжектируемых электронов  $\varepsilon_0$  превышает энергию резонансного уровня  $\varepsilon_R$  на величину, большую квантовой полуширины резонансного уровня  $\Gamma$ . В этом

случае усиление максимально на частоте  $\hbar\omega = \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_R)^2 - \Gamma^2}$ , соответствующей суб-ТГц и ТГц диапазону, а мощность генерации должна зависеть от частоты как  $1/\omega$ , что, в принципе, открывает возможности повышения мощности выходного излучения. В рамках этой теории рассмотрены также модельные РТД структуры с двумя квантовыми ямами, энергетически сдвинутыми друг относительно друга [29]. Показано, что определяющую роль в таких структурах играют межямная интерференция электронов и излучательные переходы «лазерного типа», а величина высокочастотного отклика (усиления) двухъямной РТД на резонансной частоте  $\hbar\omega_{res} = \varepsilon_{R1} - \varepsilon_{R2}$  при инжекции электронов в верхний уровень ( $\varepsilon_0 = \varepsilon_{R1}$ ) значительно превышает отклик одноямной РТД.

**Глава 2** посвящена описанию использованных в настоящей работе технологий выращивания наногетероструктур и изготовления РТД элементов на их основе, методов *in situ* и послеростовой экспресс-диагностики качества наноструктур с квантовыми ямами и методики экспериментального исследования процессов выпрямления и детектирования суб-ТГц излучения в измерительных образцах GaAs/AlAs и InGaAs/AlAs/InP РТД с одной и двумя квантовыми ямами. Отработка технологий выращивания и изготовления измерительных образцов проводилась с учетом результатов проводимых соискателем диагностических структурных и электрофизических измерений.

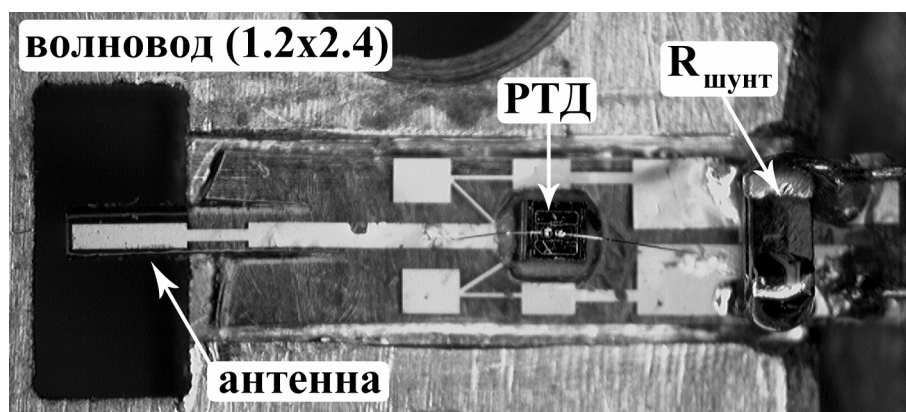
В параграфе 2.1 описаны технологические этапы изготовления измерительных образцов с меза-структурой РТД и планарными контактами. В п.2.1.1 приведено описание молекулярно-пучковой эпитаксии и *in situ* диагностической методики спектроскопии анизотропного отражения, указан состав и структурные параметры выращенных одноямных и двухъямных РТД гетероструктур (см. Таблицы 1 и 2). В п.2.1.2. кратко рассмотрены технологические операции по формированию РТД элементов (рис. 1) с использованием процессов фотолитографии, жидкостного травления и вакуумного напыления, приводится информация о размере мез, контактных площадок и других особенностях исследуемых образцов РТД.

В параграфе 2.2 описаны методы экспресс-диагностики тестовых гетероструктур на основе измерений спектров низкотемпературной фотолюминисценции и измерений поперечного транспорта в РТД при комнатной температуре, используемые с целью отработки технологий выращивания и изготовления измерительных образцов.



**Рис. 1.** Эскиз поперечного сечения образцов исследуемых РТД элементов.

В параграфе 2.3 приведено описание разработанной экспериментальной установки для изучения процессов выпрямления электромагнитных волн суб-ТГц диапазона в измерительных РТД элементах с использованием волноводных СВЧ ячеек с микрополосковыми антенной и подводящими линиями (рис. 2).

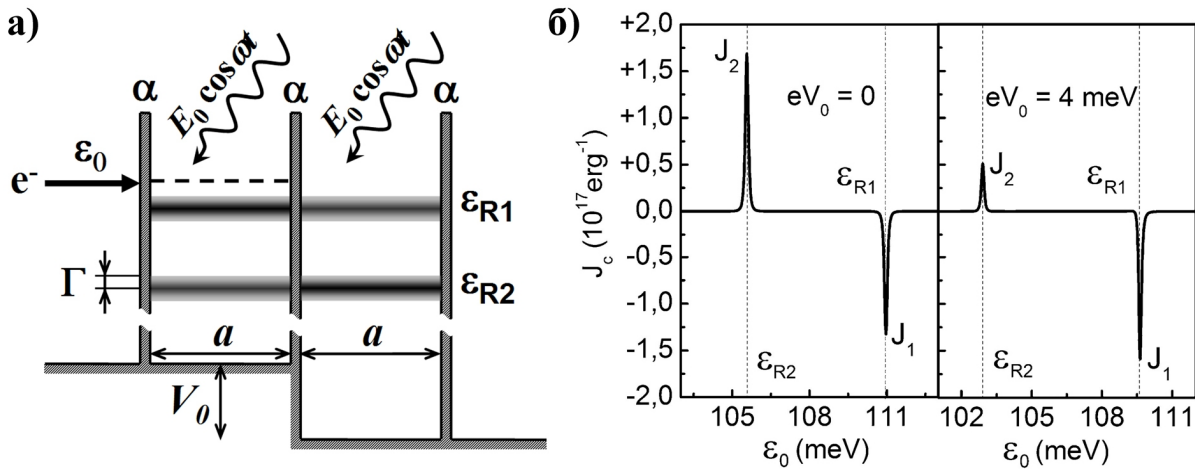


**Рис. 2.** Фотография центральной части приемной СВЧ головки.

В **Главе 3** представлены результаты выполненного нами анализа особенностей квантового режима усиления и высокочастотных свойств одноямных РТД и РТД с двумя квантовыми ямами, выполненного в рамках приближения дельта-образных барьеров без учета влияния постоянного электрического поля на электронную подсистему.

В параграфе 3.1 установлено, что одной из причин низкой эффективности одноямных РТД при генерации/усилении СВЧ волн является наличие симметрии высокочастотного отклика. Величина высокочастотного отклика меняет знак в зависимости от знака  $\delta = \epsilon_0 - \epsilon_R$ , что уменьшает суммарное усиление в

результате компенсации одинаковых по модулю отрицательного (усиление) и положительного (поглощение) сигналов при одной и той же частоте. Этот эффект является универсальным как для классического, так и квантового режимов усиления, и оказывается существенным в реальных РТД, характеризующихся фермиевским распределением электронов в предбарьерных частях структуры.



**Рис. 3.** а) Схематичное изображение потенциального профиля двухъямной РТД структуры с дельта-образными барьерами ( $\epsilon_0$  – энергия моноэнергетического потока электронов,  $\Gamma$  – квантовая полуширина резонансных уровней,  $\alpha$  – интенсивность барьеров,  $a$  – ширина квантовой ямы,  $V_0$  – относительный энергетический сдвиг соседних квантовых ям). б) Высокочастотный отклик  $J_c(\epsilon_0)$  на резонансной частоте  $\hbar\omega = \epsilon_{R1} - \epsilon_{R2}$ , рассчитанный для двухъямного РТД с симметричной структурой и при наличии энергетического сдвига  $V_0 = 4$  meV.

В параграфе 3.2 представлены результаты анализа особенностей высокочастотного отклика РТД структур с двумя квантовыми ямами (рис. 3а). Как следует из выполненных расчетов, результаты которых показаны на рис. 3б, антисимметрия высокочастотного отклика при  $V_0 = 0$  оказывается примерно такой же, как и в случае одноямного РТД: сигналы усиления  $J_1$  и поглощения  $J_2$ , определяемые, соответственно, электронными переходами типа «сверху-вниз» и типа «снизу-вверх» между уровнями расщепленного электронного состояния, оказываются примерно одинаковыми по величине. Установлено, что в РТД со сдвинутыми друг относительно друга квантовыми ямами верхний резонансный уровень  $\epsilon_{R1}$  оказывается привилегированным с точки зрения туннелирования и взаимодействия с внешним СВЧ полем (см. рис. 3б). Вследствие чего происходит нарушение симметрии сигналов  $J_1$  и  $J_2$  преимущественно за счет уменьшения вероятности поглощательных переходов.

В параграфе 3.3 обсуждаются обнаруженные в настоящей работе резонансные квантовые эффекты в двухъямных РТД структурах с распределенными носителями в предбарьерной области. Согласно данным теоретических расчетов установлена возможность возникновения в двухъямных РТД эффекта энергетической фильтрации, выделяющего из ансамбля электронов в эмиттерной области только некоторую часть электронов, с энергиями  $\varepsilon_0$  в интервале от  $\varepsilon_{R1}-\Gamma$  до  $\varepsilon_{R1}+\Gamma$ , активно взаимодействующих с внешним СВЧ полем. Показана принципиальная возможность селективного усиления и возможность перестройки резонансной частоты усиления посредством варьирования энергетического расстояния между уровнями размерного квантования в двухъямных РТД в терагерцовом диапазоне частот.

В параграфе 3.4 рассмотрены особенности нелинейного высокочастотного отклика одноямных РТД. Показано, что возрастающий с увеличением мощности внешнего СВЧ поля токовый отклик одноямных РТД в случае классического режима существенно быстрее выходит на насыщение, чем в случае «квантового» режима, что обеспечивает относительное повышение эффективности «квантового» механизма усиления СВЧ волн в РТД. Эффективности классического и «квантового» механизмов усиления практически сравниваются при значениях интенсивности СВЧ поля порядка  $10^5$  Вт/см<sup>2</sup>.

В **Главе 4** описаны результаты теоретического анализа закономерностей высокочастотного отклика в одноямных и двухъямных РТД на основе квантовой теории, построенной с учетом конечной ширины и высоты барьеров, фермиевского распределения электронов по энергиям в эмиттере и коллекторе и влияния стационарного электрического поля на электронные волновые функции и высокочастотные свойства РТД в зависимости от структурных и электрофизических параметров, частоты и амплитуды высокочастотного поля в условиях приложения к структуре постоянного напряжения.

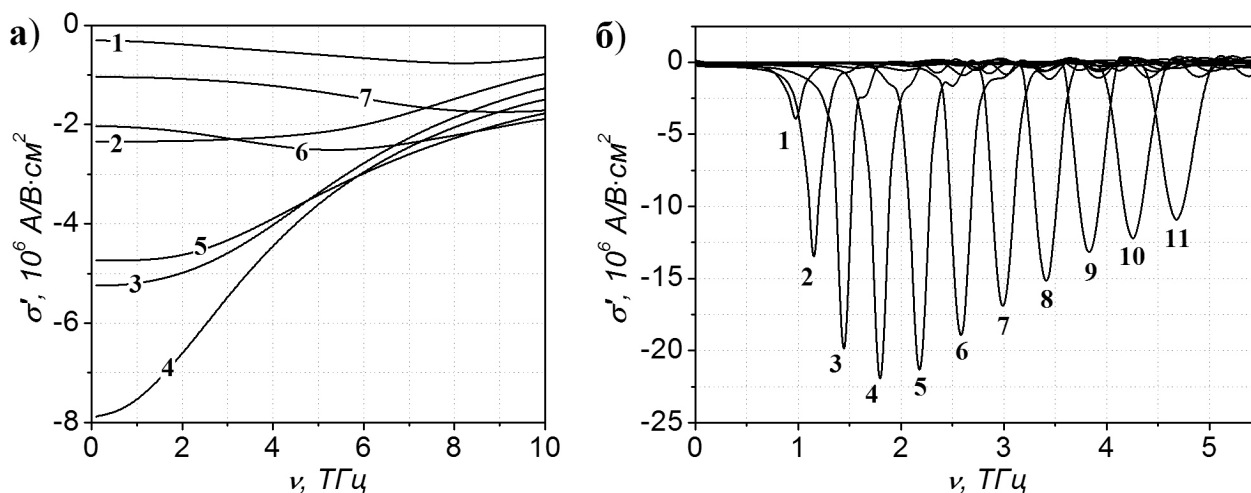
В параграфе 4.1 последовательно изложена методика расчета отклика резонансно-туннельной структуры, состоящей из одной или нескольких квантовых ям, на воздействие переменного поля  $V_{ac}(x, t)$  с учетом приложенного к структуре постоянного электрического поля  $V_{dc}(x)$  на основе решения нестационарного уравнения Шредингера с прозрачными граничными условиями. В работе рассчитывался высокочастотный отклик на периодическое воздействие с частотой  $\nu$  – действительная часть высокочастотной проводимости  $\sigma'(\nu)$ . Основными объектами исследований являлись РТД на основе соединений  $In_{0.53}Ga_{0.47}As/AlAs$  ( $m_w = 0.041m_0$ ,  $\Delta E_c = 1.2$  эВ) с предельно узкими барьерами.

В параграфе 4.2 представлены результаты анализа высокочастотного отклика одноямных РТД структур с оптимальной структурной конфигурацией. Показано, что в случае одноямных РТД с узкими ( $12 \div 15 \text{ \AA}$ ) барьерами и шириной квантовых ям порядка  $40\text{-}50 \text{ \AA}$ , оптимальных с точки зрения высокочастотных свойств РТД, реализуется во всем частотном диапазоне классический режим усиления, при котором энергия квантов высокочастотного излучения, не превышает ширины резонансного уровня  $\Gamma \sim 20 \text{ мэВ}$  (см. рис.4а). Квантовый режим усиления, при котором энергия квантов СВЧ поля должна превосходить ширину резонансного уровня, реализуется лишь при частотах, существенно превышающих терагерцовые. В п.4.2.1 для понимания физики процессов формирования отклика в реальных РТД с фермиевским распределением электронов проанализированы зависимости парциального (в приближении моноэнергетического распределения электронов в эмиттере) высокочастотного отклика одноямных РТД от энергии налетающего электрона. В п.4.2.2 проведено сравнение высокочастотных характеристик симметричных и асимметричных одноямных РТД структур, обсуждается вопрос оптимальной концентрации примеси в контактных областях.

В параграфе 4.3 представлены результаты анализа высокочастотного отклика РТД структур с двумя квантовыми ямами. Главной особенностью двухъямных РТД является то, что главные закономерности высокочастотных свойств РТД определяются преобладающим вкладом межуровневых электронных переходов и взаимодействием резонансных электронных состояний в соседних квантовых ямах. Преобладание излучательных переходов между резонансными уровнями  $\varepsilon_{R1}$  и  $\varepsilon_{R2}$  приводит к тому, что максимальные значения высокочастотного отклика в двухъямных РТД наблюдаются не в области низких частот, что характерно для одноямных РТД, а при высоких частотах, соответствующих терагерцовому диапазону. В случае структур с не очень тонкими барьерами ( $\geq 20 \text{ \AA}$ ), как можно видеть из рис. 4б, высокочастотный отклик описывается относительно узкой полосой усиления. Прослежена зависимость высокочастотного отклика для выбранной структуры от ширины среднего барьера, определяющего расстояние между резонансными уровнями.

В п.4.3.1 рассмотрены зависимости высокочастотных характеристик двухъямных РТД от ширины крайних барьеров, ширины квантовых ям, уровня Ферми в предбарьерных областях. Показано, что оптимальные структурные и электрофизические параметры двухъямных РТД определяются заданным диапазоном рабочих частот.

В п.4.3.2 с целью объяснения особенностей двухъямных РТД проанализированы зависимости парциального отклика.



**Рис. 4.** Зависимости действительной части высокочастотной проводимости  $\sigma'$  (высокочастотного отклика) от частоты  $\nu$ : а) для одноямной РТД структуры 14/45/14Å при значениях постоянного напряжения  $V_{dc}$ : **1** – 0.36В; **2** – 0.38В; **3** – 0.40В; **4** – 0.42В; **5** – 0.44В; **6** – 0.46В; **7** – 0.48В; б) для двухъямной РТД структуры 20/120/20/90/20Å при значениях постоянного напряжениях  $V_{dc}$ : **1** – 0.068 В, **2** – 0.072 В, **3** – 0.076 В, **4** – 0.080 В, **5** – 0.084 В, **6** – 0.088 В, **7** – 0.092 В, **8** – 0.096 В, **9** – 0.100 В, **10** – 0.104 В, **11** – 0.108 В.

В п.4.3.3 показано, что даже с учетом фермиевского распределения носителей в эмиттере в случае двухъямных РТД наноструктур возникает возможность реализации плавной перестройки частоты узкополосного усиления в широком диапазоне терагерцовых частот посредством варьирования прикладываемого к РТД структуре постоянного электрического напряжения. На примере двухъямной  $In_{0.53}Ga_{0.47}As/AlAs$  РТД структуры типа 20/120/20/90/20Å продемонстрирована перестройка узкополосного усиления в диапазоне  $f = 1 \div 5$  ТГц ( $\Delta f = 0.25$  ТГц) при варьировании постоянного напряжения в интервале  $V_{dc} = 0.07 \div 0.11$  В (рис. 4б).

**Глава 5** посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям процессов выпрямления электромагнитных волн суб-ТГц и ТГц диапазона в РТД наноструктурах. В параграф 5.1 приведены результаты выполненного нами численного моделирования изменений стационарных ВАХ одноямных и двухъямных РТД в присутствии внешнего высокочастотного поля: в зависимости от частоты при фиксированных амплитудах переменного поля (п.5.1.1) и в зависимости от амплитуды при фиксированной частоте 111 ТГц (п.5.1.2).

Таблица 1. Состав и структурные параметры выращенной одноямной РТД структуры.

Состав слоя	Назначение		Легирование	Толщина, Å
n <sup>+</sup> – GaAs	эмиттер		1·10 <sup>18</sup> см <sup>-3</sup>	5000
GaAs	спейсер		-	400
AlAs	активная область РТД	барьер	-	20
GaAs		яма	-	45
AlAs		барьер	-	23
GaAs	спейсер		-	100
n <sup>+</sup> – GaAs	коллектор		1·10 <sup>18</sup> см <sup>-3</sup>	10000
GaAs	подложка			

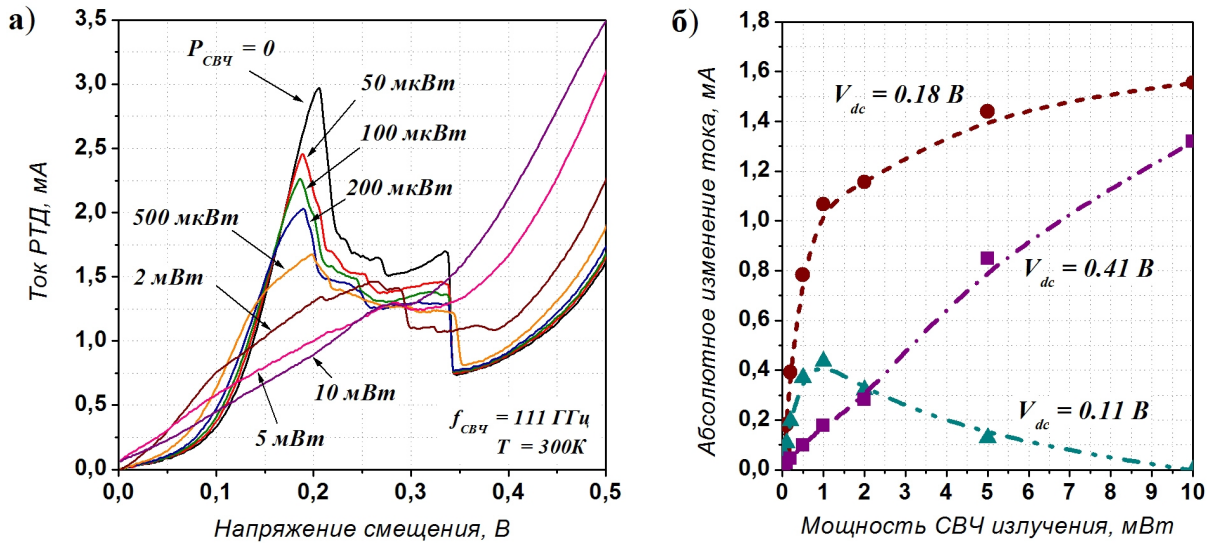
Таблица 2. Состав и структурные параметры выращенной двухямной РТД структуры.

Состав слоя	Назначение		Легирование	Толщина, Å
n <sup>+</sup> – InGaAs	эмит. контакт		1·10 <sup>19</sup> см <sup>-3</sup>	300
n – InGaAs	эмиттер		1·10 <sup>18</sup> см <sup>-3</sup>	250
InGaAs	спейсер		-	200
AlAs	активная область РТД	барьер	-	12
InGaAs		яма	-	90
AlAs		барьер	-	20
InGaAs		яма	-	120
AlAs		барьер	-	12
InGaAs	спейсер		-	20
n – InGaAs	коллектор		1·10 <sup>18</sup> см <sup>-3</sup>	250
n <sup>+</sup> – InGaAs	колл. контакт		1·10 <sup>19</sup> см <sup>-3</sup>	4000
InP	подложка			

В параграфе 5.2 изучены особенности выпрямления суб-ТГц волн в одноямных и двухямных РТД. В п.5.2.1 экспериментально исследованы детектирующие свойства РТД в режиме приложения к структуре постоянного напряжения. Представлены результаты измерений изменений ВАХ изготовленных GaAs/AlAs и InGaAs/AlAs одноямных и двухямных образцов РТД элементов под воздействием суб-ТГц излучения с частотой 111 и 222 ГГц при различных мощностях (рис. 5а). При больших интенсивностях СВЧ излучения зарегистрирован эффект насыщения, обусловленный частичной взаимной компенсацией токовых изменений, возникающих во время положительного и отрицательного полупериодов колебаний СВЧ волны в РТД. Обсуждаются линейный и нелинейный режимы в поведении токовой

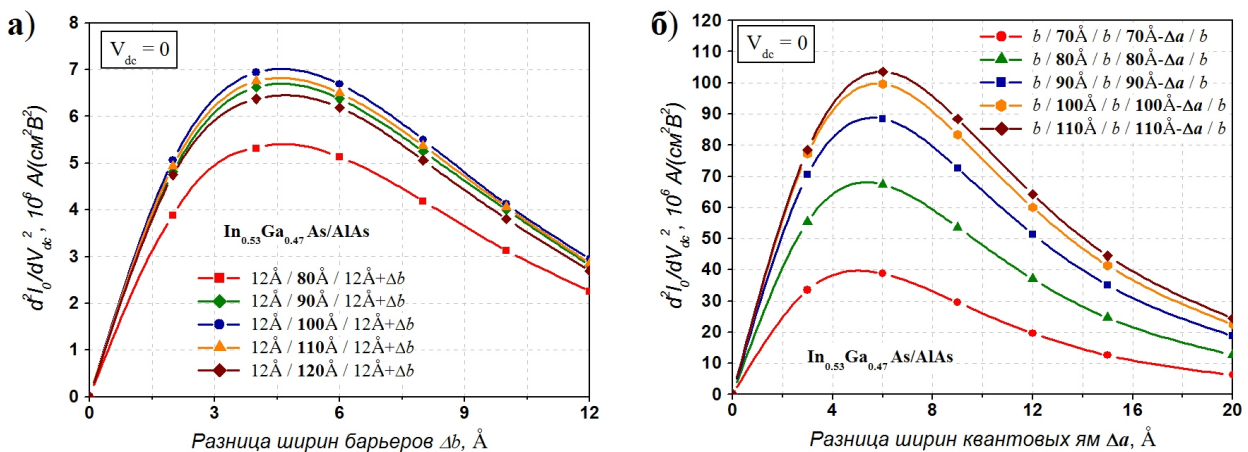


чувствительности  $\Delta I_0$  РТД (отклика на нулевой частоте) в зависимости от величины напряжения смещения  $V_{dc}$  (рис. 5б).



**Рис. 5.** а) Измеренные ВАХ двухъямного РТД элемента при различных мощностях СВЧ излучения. б) Графики изменения абсолютной величины тока в зависимости от СВЧ мощности для различных напряжений смещения  $V_{dc}$ : 0.11В, 0.18В, 0.41В.

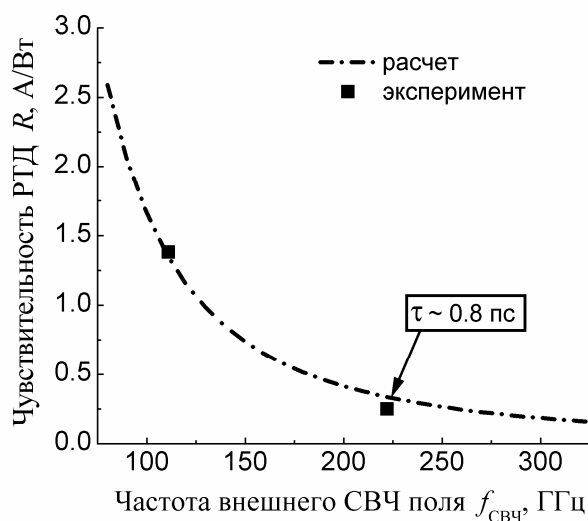
В п.5.2.2 теоретически исследованы детектирующие свойства одноямных и двухъямных InGaAs/AlAs РТД структур при нулевом напряжении смещения (zero bias). Рассмотрен как случай слабых полей, при котором изменения тока  $\Delta I_0$  пропорциональны второй производной  $d^2 I_0 / dV_{dc}^2$ , так и случай более интенсивного воздействия, когда в выпрямление переменного сигнала начинает вносить вклад область ВАХ с отрицательной дифференциальной проводимостью.



**Рис. 6.** Зависимость второй производной тока по напряжению  $d^2 I_0 / dV_{dc}^2$ : а) для одноямных РТД – от разницы ширин барьеров  $\Delta b$ ; б) для двухъямных РТД с одинаковыми барьерами ( $b = 12 \text{ \AA}$ ) – от разницы ширин квантовых ям  $\Delta a$ .

Показано, что асимметричные двухъямные РТД с оптимально подобранной структурной конфигурацией являются более предпочтительными по сравнению с асимметричными одноямными РТД с точки зрения эффективности детектирования суб-ТГц излучения (рис. 6).

В параграфе 5.3 проведена оценка быстродействия изготовленных РТД элементов, выполненная на основании результатов измерений в соответствии с методикой, изложенной в работе [9]. Показано, что времена переходных процессов в изготовленных образцах РТД структур не превышают 1 пс (рис. 7).



**Рис. 7.** Частотные зависимости расчетной и измеренной чувствительности двухъямного РТД элемента при  $V_{\text{dc}} = 0.13$  В.

В **Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в работе.

## Основные результаты работы

1. В рамках приближения дельта-образных барьеров, а также в рамках более точной теории для РТД структур с конечной высотой и шириной барьеров, учитывающей влияние постоянного электрического поля и фермиевского распределения носителей заряда в эмиттерной и коллекторной частях структуры, выполнен анализ высокочастотных свойств РТД различной конфигурации. Исследованы закономерности высокочастотного отклика РТД во внешнем переменном электрическом поле в зависимости от структурных параметров, концентрации носителей, температуры и приложенного к структуре постоянного напряжения. В высокочастотном отклике при моноэнергетической инжекции

электронов зарегистрированы резонансные полосы усиления и поглощения, проявляющиеся как в классическом режиме на низких частотах (энергия СВЧ кванта меньше ширины резонансного уровня), так и в «квантовом» режиме при суб-ТГц и ТГц частотах (энергия СВЧ кванта превышает ширину резонансного уровня).

2. В рамках приближения дельта-образных барьеров установлено, что антисимметрия высокочастотного отклика РТД с одинаковыми барьерами, обусловленная наличием одинаковых по интенсивности полосы усиления (отрицательный отклик) для инжектируемых электронов с энергией, превышающей энергию резонансного уровня, и полосы поглощения (положительный отклик) для инжектируемых электронов с энергией, меньшей энергии резонансного уровня, снижает результирующую величину высокочастотного отклика в случае РТД с распределенными по энергии электронами в предбарьерных областях. В двухъямных РТД показана превалирующая роль межуровневых переходов, снижающих влияние антисимметрии и приводящих к эффекту энергетической фильтрации, выделяющего из всего ансамбля инжектируемых электронов только некоторую часть электронов, активно взаимодействующих с внешним СВЧ полем.

3. В рамках квантовой теории, учитывающей влияние электрического поля, показано, что наложение стационарного электрического поля приводит к изменению амплитудных и частотных характеристик высокочастотного отклика в РТД, нарушению антисимметрии полос усиления и поглощения и увеличению результирующего усиления на всех частотах.

4. Показано, что в случае  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{AlAs}$  одноямных РТД с узкими ( $12\div 15\text{\AA}$ ) барьерами и шириной квантовых ям порядка  $40\text{-}50\text{\AA}$ , оптимальных с точки зрения высокочастотных свойств РТД, реализуется классический режим усиления в диапазоне суб-ТГц и ТГц частот с энергией квантов, не превышающей ширины резонансного уровня ( $\Gamma \sim 20\text{ мэВ}$ ). Квантовый режим усиления, при котором энергия квантов СВЧ поля должна превосходить ширину резонансного уровня, реализуется при частотах, существенно превышающих терагерцовые.

5. Показано, что главные закономерности высокочастотного отклика двухъямных РТД определяются наличием двух резонансных уровней и преобладающим вкладом межуровневых электронных переходов. Верхний резонансный уровень в таких структурах оказывается привилегированным, как с точки зрения туннелирования, так и с точки зрения взаимодействия с электромагнитным излучением, что приводит при энергиях квантов СВЧ поля

порядка разности энергий резонансных уровней к возрастанию высокочастотного отклика в сравнении с одноямными РТД и к возникновению особенностей, обусловленных взаимодействием электронных состояний в соседних ячейках структуры.

6. Теоретически показана в двухъямных РТД структурах возможность узкополосного усиления с плавной перестройкой резонансной частоты в диапазоне ТГц частот посредством варьирования прикладываемого к структуре напряжения. На примере двухъямной  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{AlAs}$  РТД структуры типа 20/120/20/90/20Å продемонстрирована перестройка узкополосного усиления в диапазоне  $f = 1 \div 5$  ТГц ( $\Delta f = 0.25$  ТГц) при варьировании постоянного напряжения в интервале  $V_{\text{dc}} = 0.07 \div 0.11$  В.

7. Выполнены экспериментальные и теоретические исследования процессов выпрямления суб-ТГц и ТГц волн в одноямных и двухъямных РТД. В результате проведенных измерений показано, что величина изменения стационарного тока в двухъямных  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{AlAs}/\text{InP}$  РТД под воздействием СВЧ излучения (0.1-0.2 ТГц) в случае слабых полей ( $P < 50$  мкВт) пропорциональны второй производной тока по напряжению. В более интенсивных СВЧ полях изменения стационарного тока перестают удовлетворять приближению линейной зависимости от СВЧ-мощности, возникает «эффект насыщения», обусловленный вкладом в процессы выпрямления области ВАХ с отрицательной дифференциальной проводимостью. По данным этих измерений оценено быстродействие изготовленных РТД элементов и показано, что времена переходных процессов в изготовленных образцах РТД структур не превышают 1 пс. Теоретически показана возможность детектирования суб-ТГц и ТГц волн в двухъямных РТД с оптимально подобранной структурой при нулевом напряжении смещения, превосходящего по чувствительности детектирование в асимметричных одноямных РТД.

8. Отработка технологии изготовления одноямных и двухъямных РТД наноструктур с применением методов МПЭ и процессов фотолитографии производилась на основе результатов структурных и электрофизических измерений, проводившихся *in situ* методом анизотропного отражения, а также с помощью измерений поперечного транспорта и низкотемпературной фотолюминесценции. Используемые диагностические методики обеспечили изготовление  $\text{GaAs}/\text{AlAs}$  и  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{AlAs}/\text{InP}$  гетероструктур с высоким качеством интерфейсов на уровне одного монослоя. Исследования высокочастотных свойств РТД структур проводились на экспериментальной

установке, обеспечивающей изучение процессов выпрямления суб-ТГц волн в измерительных элементах на основе РТД с использованием волноводных СВЧ ячеек с микрополосковыми линиями и антенными элементами.

### **Публикации автора по теме диссертации**

- A1. Клименко, О.А. Высокочастотный отклик и возможности регистрации квантового режима усиления в резонансно-туннельных диодных структурах / О.А. Клименко, Н.В. Дьяконова, В. Кнап, Ю.А. Митягин, В.Н. Мурзин, С.А. Савинов, В.С. Сызранов, В.А. Чуенков // КСФ. – 2009. – № 1. – С.24.
- A2. Клименко, О.А. О влиянии распределения электронов в приконтактной области и асимметрии РТД структуры на высокочастотный отклик и возможности регистрации квантового режима усиления во внешнем высокочастотном электрическом поле / О.А. Клименко, Н.В. Дьяконова, В. Кнап, Ю.А. Митягин, В.Н. Мурзин, С.А. Савинов, В.С. Сызранов, В.А. Чуенков // КСФ. – 2009. – № 1. – С.36.
- A3. Казаков, И.П. Оптическая диагностика поверхности наногетероструктур в процессе выращивания / И.П. Казаков, Е.В. Глазырин, С.А. Савинов, В.И. Цехош, С.С. Шмелев // ФТП. – 2010. – Т.44. – С.1489.
- A4. Савинов, С.А. Анализ нелинейного высокочастотного отклика резонансно-туннельных диодных структур в квантовом режиме усиления в терагерцовом диапазоне / С.А. Савинов, А.Л. Карузский, О.А. Клименко, Ю.А. Митягин, В.Н. Мурзин, А.В. Пересторонин // Труды Научной сессии НИЯУ МИФИ-2010. – 2010. – Т.3 Фундаментальные проблемы науки. – С.11.
- A5. Клименко, О.А. Нелинейный квантовый режим усиления электромагнитных волн терагерцового диапазона в резонансно-туннельных гетероструктурах / О.А. Клименко, Ю.А. Митягин, В.Н. Мурзин, С.А. Савинов, В.С. Сызранов // КСФ. – 2011. – №11. – С.39.
- A6. Савинов, С.А. Эффект энергетической фильтрации и возможности генерации терагерцового излучения в резонансно-туннельных структурах с несколькими квантовыми ямами / С.А. Савинов, В.Н. Мурзин // Письма в ЖЭТФ. – 2011. – Т.93. – С.171.
- A7. Карузский, А.Л. Нелинейные свойства двух- и трёхбарьерных резонансно-туннельных структур в суб-ТГц диапазоне / А.Л. Карузский, А.В. Пересторонин, Н.А. Волчков, Ю.С. Леонов, А.С. Ермолов, С.А. Савинов, Ю.А. Митягин, В.С. Сызранов, А.М. Цховребов, В.И. Егоркин, С.С. Шмелёв, В.Н. Мурзин // Вестник НИЯУ “МИФИ”. – 2012. – Т.1. – С.146.

- A8. Kapaev, V.V. Terahertz narrow-band tune amplification effect in triple-barrier quantum well resonant tunneling nanostructures / V.V. Kapaev, V.N. Murzin, S.A. Savinov // Proc. of SPIE. – 2012. – Vol. 8496. – 84960B.
- A9. Karuzskii, A.L. The novel THz generation and detection possibilities of resonant-tunneling based semiconductor multiple-quantum well nanostructures / A.L. Karuzskii, V.V. Kapaev, V.N. Murzin, Yu.A. Mityagin, S.A. Savinov, A.V. Perestoronin, A.M. Tshovrebov, N.A. Volchkov, I.P. Kazakov, V.I. Egorkin, S.S. Shmelev // Proc. of SPIE. – 2012. – Vol. 8700. – 8700P.
- A10. Казаков, И.П. Оптическая диагностика гетероструктур резонансно-туннельных диодов в процессе выращивания / И.П. Казаков, М.А. Базалевский, В.В. Капаев, С.А. Савинов, В.И. Цехош // Труды XVI международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника». – 2012. – Т.2 – С.374.
- A11. Савинов, С.А. Исследование нелинейных свойств и эффектов воздействия высокочастотного поля гигагерцового и субтерагерцового диапазона на статические характеристики одно- и двухъямных резонансно-туннельных GaAs/AlAs наноструктур / С.А. Савинов, И.П. Казаков, В.В. Капаев, А.Л. Карузский, О.А. Клименко, Ю.А. Митягин, А.В. Пересторонин, В.Н. Мурзин // Труды XVI международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника». – 2012. – Т.2 – С.376.
- A12. Kapaev, V.V. Electrically driven terahertz amplification frequency tuning effect in double-quantum-well resonant-tunneling structures / V.V. Kapaev, V.N. Murzin, S.A. Savinov // Workshop “Semiconductors sources and detectors of THz radiation”. Abstracts. – 2012. – P.65.
- A13. Казаков, И.П. Диагностика наногетероструктур GaAs/AlAs в процессе выращивания методами отражения / И.П. Казаков, М.А. Базалевский, В.В. Капаев, С.А. Савинов, В.И. Цехош // 2-я Научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «Мокеровские чтения». Тезисы докладов. – 2012. – С.54.
- A14. Капаев, В.В. Высокочастотный отклик и возможности перестраиваемого по частоте терагерцового узкополосного усиления в резонансно-туннельных наноструктурах / В.В. Капаев, Ю.В. Копаев, С.А. Савинов, В.Н. Мурзин // ЖЭТФ. – 2013. –Т.143. – С.569.
- A15. Kapaev, V.V. Continuous narrow-band amplification tuning effect at THz frequencies in double-quantum-well resonant tunneling nanostructures / V.V. Kapaev, V.N. Murzin, S.A. Savinov // Opt. Engineer. – 2013. – Vol.52. – 014002.

- A16. Измайлов, Г.Н. Метод измерения интенсивности суб-ТГц и ТГц излучения с использованием резонансно-туннельных диодов / Г.Н. Измайлов, Ю.А. Митягин, В.Н. Мурзин, С.А. Савинов, С.С. Шмелев, Е.М. Апостолова // Измерительная техника. – 2013. – №8. – С.16.
- A17. Измайлов, Г.Н. Метод измерения интенсивности суб-ТГц и ТГц излучения с использованием резонансно-туннельных диодов / Г.Н. Измайлов, Ю.А. Митягин, В.Н. Мурзин, С.А. Савинов // Сборник материалов XII Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы измерений». – 2013. – С.54.
- A18. Савинов, С.А. Процессы переключения и детектирования СВЧ излучения в резонансно-туннельных структурах / С.А. Савинов, А.С. Ермолов, В.Н. Мурзин, А.Л. Карузский, А.В. Пересторонин, А.А. Горбацевич, В.В. Капаев, Н.А. Волчков, В.И. Егоркин, С.С. Шмелёв, И.П. Казаков // 3-я Научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «Мокеровские чтения». Тезисы докладов. – 2013. – С.18.
- A19. Савинов, С.А. Исследование быстродействия электронных процессов и влияния внешнего СВЧ поля на стационарный ток в одноямных и двухъямных резонансно-туннельных структурах на основе InGaAs/AlAs/InP / С.А. Савинов, В.Н. Мурзин, В.В. Капаев, А.Л. Карузский, А.В. Пересторонин, В.И. Егоркин, С.С. Шмелев, Е.М. Апостолова, Г.Б. Галиев, А.А. Горбацевич // Вестник НИЯУ «МИФИ». – 2014. – Т.3. – С.210.
- A20. Караев, V. Peculiarities of sub-THz wave rectification by resonant tunneling semiconductor nanostructures at zero bias voltage / V. Караев, V. Murzin, S. Savinov, V. Egorokin // Int. Conf. “Micro- and Nanoelectronics – 2014”. Book of abstracts. – 2014. – P2-31.

### **Список цитированной в автореферате литературы**

---

1. Лебедев, А.И. Физика полупроводниковых приборов / А.И. Лебедев. – М.: Физматлит, 2008. – 488 с.
2. Khanna, A.P.S. Microwave oscillators: The state of the technology / A.P.S. Khanna // Microwave Journal. – 2006. – Vol.49. – P.22.
3. Tsu, R. Tunneling in a finite superlattice / R.Tsu, L.Esaki // Appl. Phys. Lett. – 1973. – Vol.22. – P.562.

- 
4. Шмидт, В.В. Введение в физику сверхпроводников / В.В. Шмидт. – М.: МЦНМО, 2000. – 402 с.
  5. Mazumder, P. Digital circuit applications of resonant tunneling devices / P. Mazumder, S. Kulkarni et al. // Proceedings of the IEEE. – 1998. – Vol.86. – P664.
  6. Figueiredo, J. M. L. Optoelectronic Properties of Resonant Tunneling Diodes : PhD Thesis / J. M. L. Figueiredo. – Porto, 2000.
  7. Chibashi, M. A fully-differential resonant-tunneling circuit / M. Chibashi, K. Eguchi, S. Nakagawa, T. Waho // IEICE Electronics Express. – 2005. – Vol.2. – P221.
  8. Asada, M. Resonant Tunneling Diodes for Sub-Terahertz and Terahertz Oscillator / M. Asada, S. Suzuki, N. Kishimoto // Jpn. J. Appl. Phys. – 2008. – Vol.47. – P4375.
  9. Sollner, T.C.L.G. Resonant tunneling through quantum wells at frequencies up to 2.5 THz / T.C.L.G. Sollner, W.D. Goodhue, P.E. Tannenwald, et al. // Appl. Phys. Lett. – 1983. – Vol.43. – P588.
  10. Chitta, V. Resonant tunneling at far-infrared frequencies / V. Chitta, C. Kutter, R.E.M. de Bekker, et al. // J. Phys.: Condens. Matter. – 1994. – Vol.6. – P3945.
  11. Scott, J.S. Terahertz frequency response of an  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{AlAs}$  resonant tunneling diode / J.S. Scott, J.P. Kaminski, M. Wanke, et al. // Appl. Phys. Lett. – 1994. – Vol.64. – P1995.
  12. Mendez, E.E. Resonant tunneling via X-point states in  $\text{AlAs-GaAs-AlAs}$  heterostructures / E.E. Mendez, W.I. Wang, E. Calleja, C.E.T. Gonçalves da Silva // Appl. Phys. Lett. – 1987. – Vol.50. – P1263.
  13. Goldberg, Yu.A. Handbook Series on Semiconductor Parameters. Vol.2 / Yu.A. Goldberg, N.M. Schmidt. – London:World Scientific, 1999.
  14. Chunlin, H. InP-base resonant tunneling diodes / H. Chunlin, C. Chen, Z. Penghui et al. // J. Semicond. – 2009. – Vol.30. – 064001.
  15. Sugiyama, H. Extremely high peak current densities of over  $1 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup> in InP-based  $\text{InGaAs}/\text{AlAs}$  resonant tunneling diodes grown by metal-organic vapor-phase epitaxy / H. Sugiyama, H. Yokoyama, A. Teranishi, et al. // Jpn. J. Appl. Phys. – 2010. – Vol.49. – 051201.
  16. Сызранов, В.С. Одноямные резонансно-туннельные диодные гетероструктуры на основе  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{AlAs}/\text{InP}$  с отношением пикового тока к току долины 22:1 при комнатной температуре / В.С. Сызранов, О.А. Клименко, А.С. Ермолов и др. // КСФ. – 2013. – №8. – С.48.



- 
17. Feiginov, M. Resonant-tunnelling-diode oscillators operating at frequencies above 1.1THz / M. Feiginov, C. Sydlo, O. Cojocari, P. Meissner // *Appl. Phys. Lett.* – 2011. – Vol.99. – 233506.
  18. Koyama, Y. Oscillations up to 1.40 THz from resonant-tunneling-diode-based oscillators with integrated patch antennas / Y. Koyama, R. Sekiguchi, T. Ouchi // *Appl. Phys. Express.* – 2013 – Vol.6 – 064102.
  19. Kanaya, H. Fundamental Oscillation up to 1.42 THz in Resonant Tunneling Diodes by Optimized Collector Spacer Thickness / H. Kanaya, R. Sogabe, T. Maekawa, et al. // *J. Infrared Milli Terahz Waves.* – 2014. – Vol.35. – P425.
  20. Takahagi, S. Equivalent circuit model of triple-barrier resonant tunneling diodes monolithically integrated with bow-tie antennas and analysis of rectification properties towards ultra wideband terahertz detections / S. Takahagi, H. Shin-ya, K. Asakawa, et al. // *Jpn. J. Appl. Phys.* – 2011. – Vol.50. – 01BG01.
  21. Suhara M. Analysis of terahertz zero bias detectors by using a triple-barrier resonant tunneling diode integrated with a self-complementary bow-tie antenna / M. Suhara, S. Takahagi, K. Asakawa, et al. // *Device Research Conference 2012, 70th Annual.* – 2012. – P77.
  22. Matsuzaki, H. Monolithic integration of resonant tunneling diodes, Schottky barrier diodes and 0,1- $\mu$ m-gate high electron mobility transistors for highspeed ICs / H. Matsuzaki, J. Osaka, T. Itoh, et al. // *Jpn. J. Appl. Phys.* – 2001. – Vol.40. – P2186.
  23. Slight, T.J. Integration of a resonant tunnelling diode and an optical communications laser : PhD Thesis / T.J. Slight. – Glasgow, 2006.
  24. Haitao, Q. InP-based RTD/HEMT monolithic integration / Q. Haitao, G. Weilian, L. Yali, et al. // *Transactions of Tianjin University.* – 2010. – Vol.16. – P267.
  25. Алмазов-Долженко, К.И. Техническая электродинамика и устройства СВЧ / К.И. Алмазов-Долженко, А.Н. Королёв. – М.:Научный мир, 2006. – 262 с.
  26. Елесин, В.Ф. К теории когерентной генерации резонансно-туннельного диода / В.Ф. Елесин // *ЖЭТФ.* – 1999. – Т.116. – С.704.
  27. Елесин, В.Ф. Высокочастотный отклик двухбарьерных наноструктур / В.Ф. Елесин // *ЖЭТФ.* – 2002. – Т.121. – С.925.
  28. Елесин, В.Ф. Резонансное туннелирование и нелинейный отклик в высокочастотном поле / В.Ф. Елесин // *ЖЭТФ.* – 2003. – Т.124. – С.379.
  29. Елесин, В.Ф. Высокочастотный отклик двухъямных наноструктур / В.Ф. Елесин // *ЖЭТФ.* – 2005. – Т.127. – С.131.

- 
30. Brown, E.R. Fundamental oscillations up to 200 GHz in resonant tunneling diodes and new estimates of their maximum oscillation frequency from stationary-state tunneling theory / E.R. Brown, W.D. Goodhue, T.C.L.G. Sollner // J. Appl. Phys. – 1988. – Vol.64. –P.1519.
  31. Brown, E.R. Oscillations up to 712 GHz in InAs/AlSb resonant-tunneling diodes / E.R. Brown, C.D. Parker, L.J. Mahoney, et al. // Appl. Phys. Lett. – 1991. – Vol.58. – P.2291.