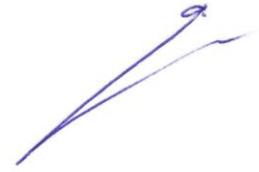


На правах рукописи



Ермачихин Александр Валерьевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУР
НА ОСНОВЕ СИСТЕМ InGaAs/GaAs, InAs/InGaAs/GaAs
И МИКРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЯ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$
МЕТОДОМ СПЕКТРОСКОПИИ НИЗКОЧАСТОТНОГО ШУМА**

01.04.10 – Физика полупроводников

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Рязань 2014

Работа выполнена на кафедре биомедицинской и полупроводниковой электроники ФГБОУ ВПО "Рязанский государственный радиотехнический университет"

Научный руководитель: **Литвинов Владимир Георгиевич**
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Биомедицинская и полупроводниковая электроника» ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет», г. Рязань

Официальные оппоненты: **Мошников Вячеслав Алексеевич**
доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Микро- и наноэлектроника» ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург

Здоровейщев Антон Владимирович
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник «Научно-исследовательского физико-технического института» ФГАОУ ВО «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», г. Нижний Новгород

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

Защита диссертации состоится "23" декабря 2014 года в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.211.03 в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО "РГРТУ" или на сайте <http://www.rsreu.ru/>.

Автореферат разослан " " ноября 2014 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д-р. техн. наук, проф.


_____ М.В. Чиркин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Наноразмерные структуры нашли широкое практическое применение в качестве активной области для лазерных излучателей, оптических усилителей, модуляторов светового излучения, устройств памяти и др. С уменьшением минимальных размеров активных элементов полупроводниковой электроники увеличивается значение влияния дефектов на характеристики электронных приборов. Шумы напряжения и тока в электронных приборах определяют нижние пределы их чувствительности. При высоком уровне шума информация может стать и вовсе недоступной. Шумы, возникающие в электронных твердотельных приборах, ограничивают динамический диапазон рабочих характеристик. Ими определяются как минимальный размер элемента, так и минимальная величина питающего напряжения¹. С другой стороны, шумы из-за флуктуаций тока или напряжения содержат ценную информацию об особенностях внутренней структуры электрической системы. Поэтому из анализа шумов можно сделать выводы о некоторых характеристиках системы, определить некоторые ее параметры. В этом случае флуктуации используются для получения полезной информации о состоянии системы, о протекающих в ней процессах, создающих шум как таковой².

Одним из перспективных методов исследования электрофизических свойств полупроводниковых структур является спектроскопия низкочастотного (НЧ) шума. Также диагностика НЧ шума является инструментом, который позволяет прогнозировать отказ электронного компонента на любом этапе его эксплуатации. Имеется значительный теоретический и экспериментальный материал по физическим и статистическим свойствам НЧ шума различных объектов, который был получен рядом исследователей: Ван дер Зил (A. Van der Ziel), Дю При (F.K. Du Pre), Белл (D.A. Bell), Хоуге (F.N. Hooge), Датта (P. Dutta), Кларк (J. Clarke) и Восс (R.F. Voss), Вейсман (M.V. Weissman), Букингам (M.J. Buckingham), И.Н. Мирошникова, А.Н. Малахов, Ш.М. Коган, Н.Б. Лукьянчикова, Г.П. Жигальский, М.Е. Левинштейн, В.Б. Орлов и А.В. Якимов, П.Т. Орешкин и др. Большинство работ по изучению полупроводниковых материалов и структур посвящены исследованию дефектов с глубокими уровнями (ГУ).

В настоящее время предметом интенсивных исследований электрофизических свойств являются диодные структуры с квантовыми ямами (КЯ) и точками (КТ). При этом основными методами исследования энергетического спектра электронных состояний являются спектроскопия адмит-

¹ Жигальский Г.П. Флуктуации и шумы в электронных твердотельных приборах. – М.: Физматлит, 2012. – 512 с.

² Разуменко Д.В. Низкочастотные шумы электронных компонентов как инструмент для диагностики внутренних дефектов // Компоненты и технологии. – 2008. – № 9. – С 168-174.

танса, методы вольт-амперных характеристик (ВАХ) и вольт-фарадных характеристик (ВФХ), релаксационная спектроскопия глубоких уровней (РСГУ или DLTS). Применение этих методов позволяет измерять энергию активации процессов эмиссии и захвата носителей заряда (НЗ) в КЯ, рассчитывать величины разрывов разрешенных энергетических зон – важнейших параметров, используемых для проектирования полупроводниковых приборов с заданными характеристиками. Однако существует потребность в адаптации известного метода спектроскопии низкочастотного шума для диагностики полупроводниковых наноструктур. Изучение энергетического спектра электронных состояний НЗ в полупроводниковых наноструктурах методом спектроскопии НЧ шума представляет практический интерес, поскольку обеспечиваются стационарные условия измерений и может быть обнаружена взаимосвязь измеренных спектров плотности мощности низкочастотного шума с наличием в диодной структуре квантово-размерной части. С учетом этой взаимосвязи могут быть определены энергетические параметры процесса генерации НЧ шума с участием электронных уровней в КЯ или КТ.

В настоящее время наблюдается динамичный рост рынка энергонезависимых запоминающих устройств (ЗУ). Все больше внимания уделяется разработке альтернативных технологий ЗУ, в частности технологии фазовой памяти, принцип работы которой основан на быстротекущих обратимых фазовых переходах «аморфное ↔ кристаллическое состояние», происходящих в объеме программируемого материала под действием внешних низкоэнергетических воздействий (свет или электрический импульс) и сопровождающихся скачкообразным изменением оптических или электрических характеристик соответственно. Наиболее перспективным материалом для устройств фазовой памяти в настоящее время считается халькогенидное стеклообразное полупроводниковое соединение (ХСП) $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST225)³. Спектроскопия НЧ шума может оказаться полезным инструментом для изучения особенностей фазового перехода, основанных на анализе изменений уровня спектральной плотности мощности (СПМ) при фазовом переходе. В связи со сказанным выше тему диссертационной работы следует считать актуальной.

Цель диссертационной работы – развитие модели генерации низкочастотного шума в полупроводниковых наноструктурах с квантовыми ямами с учетом квантово-размерных эффектов, а также методики спектроскопии низкочастотного шума для проведения исследований и расширения возможностей диагностики наноструктур с квантовыми точками и квантовыми ямами.

³ Burr G. W. et al. Phase change memory technology // Journal of Vacuum Science and Technology B. – 2010. – V. 28. – № 2. – P. 223-262.

Основные задачи

1. Анализ существующих физических моделей формирования низкочастотного шума, электрических методов диагностики энергетических электронных состояний в полупроводниковых структурах.

2. Развитие модели генерации низкочастотного шума в полупроводниковых наноструктурах с квантовыми ямами с учетом квантово-размерных эффектов.

3. Разработка комплексной методики диагностики полупроводниковых диодных структур с квантовыми ямами или точками с использованием спектроскопии низкочастотного шума, методов вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик для исследования энергетического спектра электронных состояний.

4. Разработка и создание аппаратно-программного комплекса спектроскопии низкочастотного шума, спектроскопии адмиттанса, методов вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик в температурном диапазоне 7-500 К полупроводниковых наноструктур с квантовыми ямами и микроструктур на основе халькогенидных стеклообразных полупроводников.

5. Экспериментальное изучение вольт-амперных, вольт-фарадных характеристик, спектров низкочастотного шума в полупроводниковых наноструктурах с квантовыми ямами InGaAs/GaAs, множественными квантовыми ямами и слоем квантовых точек InAs/InGaAs/GaAs и микроструктурах на основе тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, легированного Bi, в аморфном и кристаллическом фазовом состоянии.

6. Расчет энергии активации электрически активных энергетических уровней в полупроводниковых наноструктурах с квантовыми ямами InGaAs/GaAs, множественными квантовыми ямами и слоем квантовых точек InAs/InGaAs/GaAs по результатам экспериментальных исследований, а также параметров спектров низкочастотного шума в микроструктурах на основе тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, легированного Bi, в аморфном и кристаллическом фазовом состоянии.

Основными объектами исследований являлись полупроводниковые наногетероструктуры с квантовыми ямами на основе системы InGaAs/GaAs и наногетероструктуры с множественными КЯ и погруженными в них слоями квантовых точек на основе системы InAs/InGaAs/GaAs, микроструктуры на основе тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST225), легированного Bi, в аморфном и кристаллическом фазовом состоянии.

Научная новизна представленных в работе результатов заключается в следующем:

1. Предложена комплексная методика исследования энергетического спектра электронных состояний в полупроводниковых микроструктурах и наноструктурах с квантовыми ямами, основанная на совместном измере-

нии температурной зависимости спектров низкочастотного шума, вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик.

2. Предложено использование математического соотношения, описывающего частотную и температурную зависимость спектральной плотности мощности низкочастотного шума, генерируемого при захвате и эмиссии носителей заряда с энергетических уровней размерного квантования в квантовой яме в полупроводниковой барьерной структуре, что позволило учитывать фактор заполнения квантовой ямы носителями заряда.

3. Впервые по температурным зависимостям спектров низкочастотных шумов определена энергия активации процесса эмиссии дырок из слоя квантовых точек InAs в наногетероструктуре с множественными квантовыми ямами и погруженными в них слоями квантовых точек на основе системы (DUWELL) InAs/In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs, предназначенной для изготовления лазера с рабочей длиной волны 1,3 мкм, с помощью разработанной методики.

4. Обнаружено увеличение спектральной плотности мощности низкочастотного шума в 10-100 раз в микроструктурах на основе тонких пленок Ge₂Sb₂Te₅ с содержанием Bi 0, 1 и 3 % при фазовом переходе материала пленки из аморфного состояния в кристаллическое.

Положения и результаты, выносимые на защиту

1. Физическая модель, описывающая спектральную плотность мощности низкочастотного шума в полупроводниковых наноструктурах с квантовыми ямами с учетом квантово-размерных эффектов, которая позволяет определить энергию активации процесса эмиссии носителей заряда с энергетических уровней размерного квантования в квантовой яме с учетом заполнения квантовой ямы носителями заряда.

2. Методика измерения энергетического спектра электронных состояний в полупроводниковых микроструктурах и наноструктурах с квантовыми ямами и/или слоями квантовых точек, основанная на совместном измерении температурной зависимости спектров низкочастотного шума, вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик, которая позволяет исследовать генерацию низкочастотного шума в локальных областях и заданной квантово-размерной части исследуемого образца и определять энергию активации процесса эмиссии носителей заряда с уровней размерного квантования.

3. Энергия активации процесса эмиссии электронов с основного уровня размерного квантования из квантовой ямы в диодной наноструктуре на основе системы In_{0.22}Ga_{0.78}As/GaAs, полученная по температурным зависимостям спектров низкочастотного шума и рассчитанная с помощью разработанной методики измерения, повышается от 58±20 мэВ в условиях опустошения электронами квантовой ямы до 148±20 мэВ в условиях полного заполнения электронами квантовой ямы.

4. Введение Bi до 1 масс. % в аморфные пленки на основе $(\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5)_{1-x}\text{Bi}_x$ приводит к уменьшению значений спектральной плотности мощности низкочастотного шума в 50-100 раз, а введение Bi более 1 масс. % приводит к увеличению значений спектральной плотности мощности низкочастотного шума в 10-15 раз по сравнению с величиной СПМ в аморфных пленках $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ в диапазоне частот 10^{-2} - 10^2 Гц при напряженности электрического поля менее $5 \cdot 10^5$ В/м.

Достоверность научных результатов работы подтверждается непротиворечивостью полученных результатов общепринятым положениям физики полупроводников, обеспечивается использованием известного математического аппарата физики полупроводников и квантовой физики и подтверждается совпадением с результатами исследований, полученными независимыми методами: фотолюминесценции, релаксационной спектроскопии глубоких уровней, спектроскопии адмиттанса.

Личный вклад автора. Результаты экспериментов, основные выводы диссертационной работы получены и сформулированы автором лично на кафедре биомедицинской и полупроводниковой электроники, на оборудовании лаборатории электрофизических измерений РЗЦМкп при РГРТУ, а также в ходе научно-исследовательских стажировок в лабораториях НОЦ «Физика твердотельных наноструктур» Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и НОЦ «Материалы нанoeлектроники и фотоники» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Практическая значимость работы заключается в следующем:

- Разработана комплексная методика измерения энергетического спектра электронных состояний в полупроводниковых микроструктурах и наноструктурах с квантовыми ямами и/или слоями квантовых точек, основанная на совместном измерении температурной зависимости спектров низкочастотного шума, вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик, позволяющая исследовать генерацию низкочастотного шума в локальных областях и заданной квантово-размерной части исследуемого образца.
- Разработан автоматизированный аппаратно-программный комплекс, позволяющий проводить измерения спектров мощности низкочастотного шума в диапазоне частот 0,01-10000 Гц, адмиттанса, вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик в температурном диапазоне 7-500 К.
- Разработано программное обеспечение для созданного аппаратно-программного комплекса, подтвержденное свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ (№ 2013616399, 2014610621, 2014617224, 2014617225).

- Экспериментально определена энергия активации процесса эмиссии дырок 483 ± 20 мэВ из слоя квантовых точек InAs в наногетероструктуре с множественными квантовыми ямами и погруженными в нее слоями квантовых точек на основе системы (DUWELL) InAs/In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs, предназначенной для изготовления лазера с рабочей длиной волны 1,3 мкм, позволяющая уточнить зонную диаграмму наногетероструктуры.
- Экспериментально показано, что при переходе фазового состояния тонких пленок Ge₂Sb₂Te₅, легированных Bi, из аморфного в кристаллическое происходит увеличение спектральной плотности мощности низкочастотного шума в 10-100 раз.

Апробация. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на VIII, IX Международных конференциях «Аморфные и микрокристаллические полупроводники» (г. Санкт-Петербург, 2012, 2014), V, VI, VII Всероссийских школах-семинарах студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур» (г. Рязань, 2012, 2013, 2014), XI Международной научно-практической конференции «Инженерные и научные приложения на базе National Instruments-2012» (г. Москва, 2012), 43-м Международном научно-методическом семинаре "Флуктуационные и деградационные процессы в полупроводниковых приборах" (г. Москва, 2012), XI Российской конференции по физике полупроводников (г. Санкт-Петербург, 2013), Всероссийской молодежной школе-семинаре «Диагностика наноматериалов и наноструктур» (г. Рязань, 2013), XII Международной конференции компании National Instruments «Инженерные и научные приложения на базе технологии National Instruments-2013» (г. Москва, 2013), 21-й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Микроэлектроника и информатика 2014» (г. Москва, 2014), 32-nd International conference on the physics of semiconductors (Austin, Texas, USA, 2014), а также на ежегодных научно-технических конференциях Рязанского государственного радиотехнического университета.

Публикации. Основные результаты опубликованы в 32 научных работах, из них 9 статей в журналах из списка ВАК, 3 статьи в переводных изданиях, 15 тезисов докладов на российских и международных конференциях, 5 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 219 наименований и 2 приложений. Диссертация изложена на 182 страницах машинописного текста, содержит 16 таблиц и 123 рисунка.

Внедрение результатов. Полученные экспериментальные результаты использованы при подготовке отчетов о НИР 19-12, 35-12Г; в учебном процессе: в лекционных материалах по дисциплине «Методы исследования материалов и структур электроники».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертации, отражены новизна и практическая значимость работы, представлена структура диссертации.

В **первой главе** представлен аналитический обзор электрических методов исследования энергетического спектра электронных состояний в полупроводниковых структурах. Рассмотрены методы спектроскопии НЧ шума, ВФХ, DLTS. Эти методы широко применяются для исследования глубоких энергетических уровней в полупроводниковых барьерных структурах. Недостатком всех методов исследования, основанных на измерении электрической емкости образца, являются повышенные требования к конфигурации образцов (необходимо наличие покровного слоя определенной толщины при заданном уровне легирования в структурах с квантовыми ямами или слоями квантовых точек, низкое сопротивление базы, значение барьерной емкости структуры в диапазоне 10-100 пФ). В связи с этим возникают сложности при изучении слаболегированных структур.

Спектроскопия НЧ шума позволяет исследовать образцы с омическими или барьерными контактами в стационарных условиях измерения. В связи с этим развитие метода спектроскопии НЧ шума для исследования электрофизических свойств полупроводниковых наноструктур является актуальной задачей.

Вторая глава посвящена описанию аппаратно-программного комплекса (рис. 1). Для решения ряда задач по исследованию полупроводниковых структур с КЯ и КТ существует необходимость в проведении эксперимента в широком температурном диапазоне.

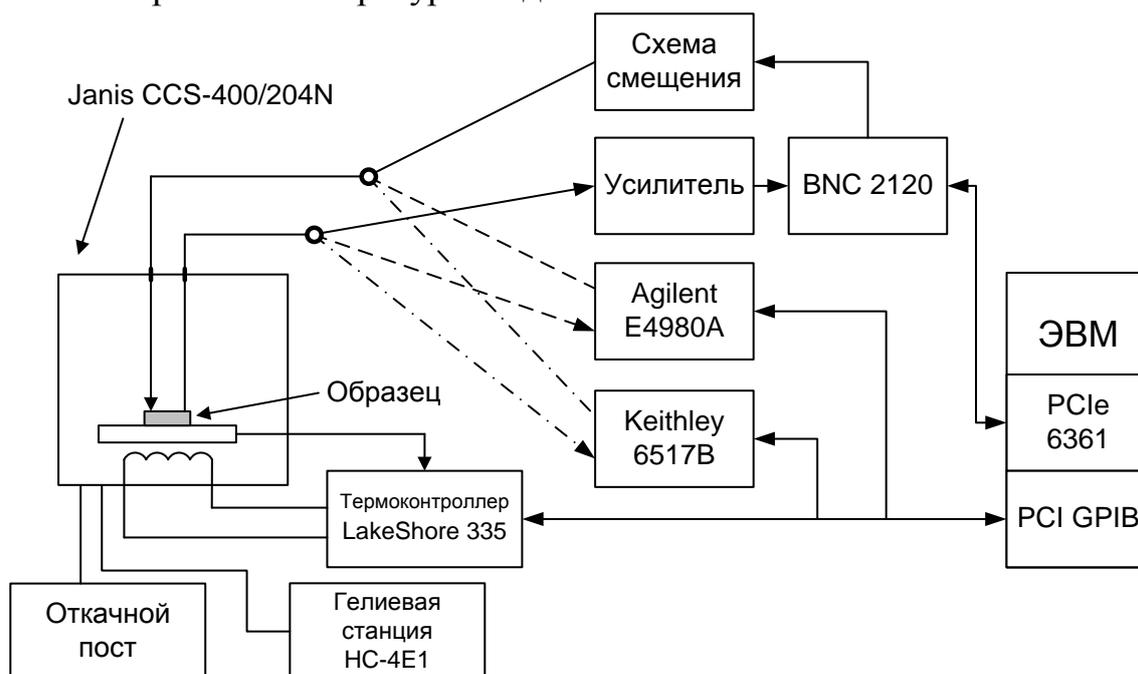


Рисунок 1 – Схема измерительного комплекса

В качестве измерительной ячейки использовался криостат Janis CCS-400/204N. Приведены алгоритмы и схемы измерительного комплекса. Для измерения СПМ НЧ шума был сконструирован автоматизированный измерительно-аналитический комплекс, включающий малошумящий усилитель, схему смещения напряжения с гальваническим источником питания и плату сбора данных NI PCIE 6361 с блоком разъемов NI BNC 2120. Для измерения адмиттанса и ВФХ использовался автоматизированный комплекс на базе LCR метра Agilent E4980A. Для измерений ВАХ использовался вольтметр электрометрический Keithley 6517В с ПО.

В третьей главе представлены результаты исследования наногетероструктур InGaAs/GaAs с КЯ и наногетероструктуры с множественными КЯ и погруженными в них слоями квантовых точек на основе системы InAs/InGaAs/GaAs. Образцы исследовались методами фотолюминесценции, ВАХ, ВФХ, DLTS и спектроскопии НЧ шума.

Развит метод исследования измерений СПМ НЧ шума в структурах с КЯ и КТ, алгоритм показан на рис. 2. Для установления необходимого напряжения на образце, при котором обнаруживается генерация НЧ шума с участием электронных энергетических уровней в КЯ, необходимо предварительно измерить ВАХ и ВФХ. Данные ВАХ и ВФХ позволяют выбрать напряжение смещения на структуре таким образом, чтобы контролировать положение края (внутренней границы) области пространственного заряда (ОПЗ) относительно слоя КЯ или КТ.

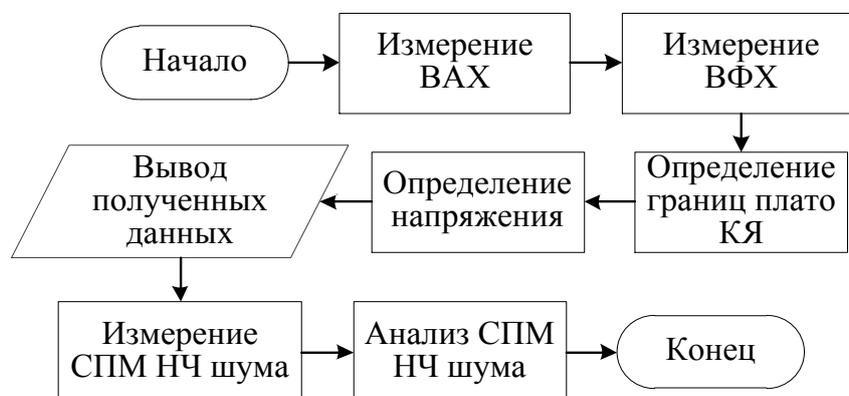


Рисунок 2 – Алгоритм эксперимента

Согласно известной модели СПМ НЧ шума $S(\omega)$ как стационарный случайный процесс описывается лоренцевой функцией:

$$S(\omega) = C \frac{\tau}{1 + \omega^2 \tau^2}, \quad (1)$$

где ω – круговая частота ($\omega=2\pi f$); C – коэффициент пропорциональности; τ – время релаксации процесса перезарядки энергетических уровней. На частотной зависимости СПМ наблюдается характерный излом на частоте f_b . При этом излому СПМ соответствует выражение:

$$\omega_b \tau = 1. \quad (2)$$

При рассмотрении квантовой ямы для электронов проводимости и основного уровня размерного квантования время τ можно найти как время релаксации для процесса эмиссии электронов из КЯ с основного уровня размерного квантования⁴:

$$\tau = \frac{f \lambda_T}{2 \langle v_T \rangle} \exp\left(\frac{\Delta E_C - E_{e1}}{kT}\right), \quad (3)$$

где $\langle v_T \rangle = (8kT/\pi m_n^*)^{1/2}$ – средняя тепловая скорость электронов в барьерных слоях; $\lambda_T = (2\pi\hbar^2/m_w^* kT)^{1/2}$ – термическая длина; m_n^* – эффективная масса электрона в барьерном слое; m_w^* – эффективная масса электрона в КЯ; ΔE_C – величина разрыва зоны проводимости; k – постоянная Больцмана; T – температура; E_{e1} – энергия основного уровня размерного квантования электронов в КЯ; f – фактор заполнения КЯ электронами с учетом вырождения двумерного газа носителей заряда в КЯ, определяемый как⁴

$$f = \sum_n \ln \left[1 + \exp\left(-\frac{E_{CW} + E_{en} - E_F}{kT}\right) \right] \exp\left(\frac{E_{e1}}{kT}\right),$$

где n – номер уровня размерного квантования; E_F – энергия Ферми; E_{CW} – положение дна зоны проводимости в КЯ; E_{en} – энергия n -го энергетического уровня размерного квантования в КЯ.

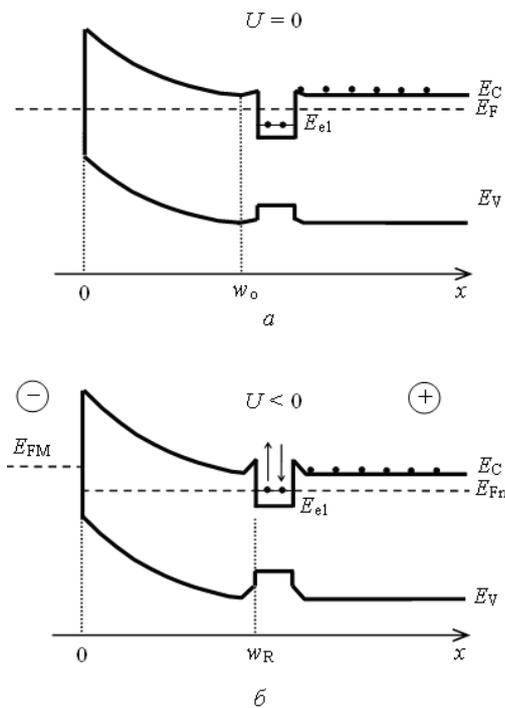


Рисунок 3 – Зонная диаграмма диода Шоттки с КЯ в базе n-типа

Скорость эмиссии НЗ зависит от степени заполнения КЯ носителями заряда, поэтому в большей степени зависит от внешних условий по сравнению со скоростью эмиссии НЗ с обычных ГУ, образованных точечными дефектами структуры и их комплексами. Представленные выражения использовались для определения энергии активации электронов из КЯ и положены в основу разработанной комплексной методики. В случае когда КЯ не граничит с ОПЗ (рис. 3, а), а находится в квазиэлектронейтральной базе, квазиуровень Ферми оказывается несколько выше уровня размерного квантования E_{e1} , и электронам энергетически не выгодно покинуть уровень E_{e1} . При увеличении обратного напряжения смещения на диоде внутренняя граница ОПЗ перемещается вглубь базы от точки с координатой w_0 до

⁴ Schmalz K., Yassievich I.N., Rucker H., Grimmeis H.G. Characterization of Si/Si_{1-x}Ge_x/Si quantum wells by space-charge spectroscopy // Phys. Rev. B. – 1994. – V. 50. – P. 14287-14301.

w_R и достигает КЯ. Квазиуровень Ферми оказывается вблизи или совпадает с уровнем E_{el} , начинается процесс эмиссии (генерации) электронов и обратный процесс – захват электронов в КЯ (рис. 3, б) и как следствие – генерация НЧ шума.

Величины энергии активации (см. табл. 1 и 2) определялись по углу наклона прямых Аррениуса. Полученные данные подтверждены независимым способом DLTS (155 ± 20 и 483 ± 20 мэВ для образцов InGaAs/GaAs и InAs/InGaAs/GaAs соответственно).

Таблица 1 – Значения энергий активации в наногетероструктуре InGaAs/GaAs с КЯ

Положение границы ОПЗ	E_a , мэВ
Касается КЯ	148 ± 20
В середине КЯ	78 ± 20
За пределами КЯ	58 ± 20

Таблица 2 – Значения энергий активации в наногетероструктуре с множественными КЯ и погруженными в них слоями квантовых точек на основе системы InAs/InGaAs/GaAs

Напряжение на образце, В	E_a , мэВ
2	487 ± 20
3	469 ± 20
5	223 ± 20

Четвертая глава посвящена исследованию пленок GST225 с различным содержанием Вi. Для материалов системы Ge-Sb-Te расположение атомов в аморфном состоянии существенно отличается от кристаллической фазы, что приводит к значительному различию в удельном сопротивлении и большому оптическому контрасту. Эти уникальные свойства лежат в основе практических применений Ge-Sb-Te в качестве активной области элементов оптической и электрической памяти.

Были проведены измерения СПМ НЧ шума образцов GST225 с различным содержанием Вi при комнатной температуре. Из рис. 4 видно, что наибольшее значение СПМ имеет образец с 3 масс. % содержания Вi, а образец с 1 масс. % Вi имеет значения СПМ меньше, чем образец, не содержащий Вi. Следовательно введение небольшой доли Вi (1 масс. %) приводит к снижению значения шума в пленках GST225, что характерно для более упорядоченной структуры. Увеличение Вi ведет к росту СПМ. Также обнаружено, что с увеличением напряжения на образце разница между значениями СПМ заметно уменьшается.

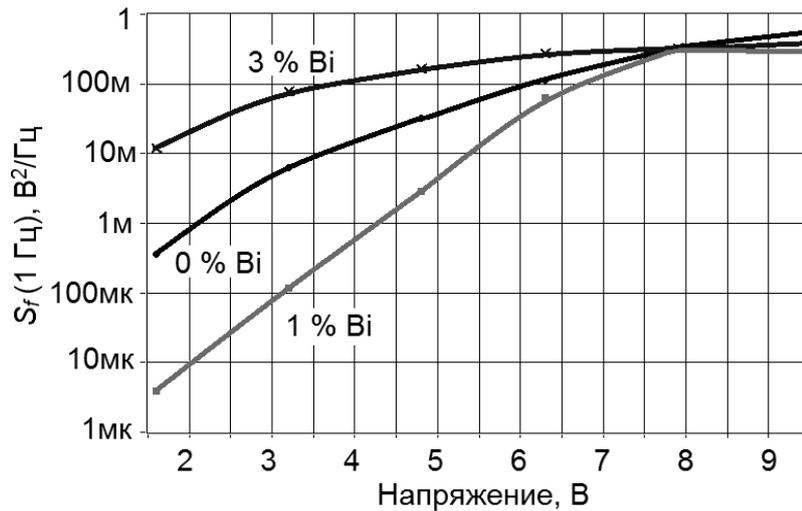


Рисунок 4 – СПМ образцов GST225 с различным содержанием Bi

Переход из одного фазового состояния в другое осуществлялся линейным нагревом (неизотермические условия) при подаче постоянного напряжения на образец (10 В). Сравнение СПМ в различных фазовых состояниях показано на рис. 5.

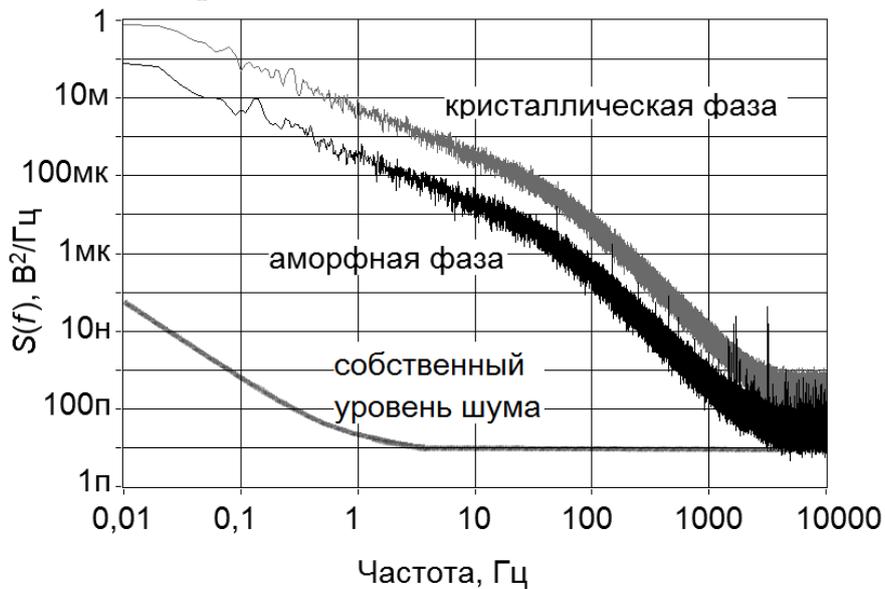


Рисунок 5 – СПМ образца в различных фазовых состояниях (0 масс. % Bi)

Измеренные СПМ шума образцов GST225 в фазе кристаллического состояния показали, что при переключении фазового состояния происходит увеличение значений СПМ шума, что характерно для перехода из более упорядоченного в менее упорядоченное состояние. Но кристаллическое состояние является более упорядоченным, чем аморфное. Данный парадокс можно объяснить тем, что при переключении возникают дополнительные дефекты, которые в свою очередь и служат источниками дополнительных флуктуаций напряжения.

В заключении сформулированы основные выводы.

Основные выводы

1. Развита физическая модель, описывающая спектральную плотность мощности низкочастотного шума в полупроводниковых наноструктурах с квантовыми ямами с учетом квантово-размерных эффектов. Получено математическое соотношение, описывающее частотную и температурную зависимость спектральной плотности мощности низкочастотного шума, генерируемого при захвате и эмиссии носителей заряда с энергетических уровней размерного квантования в квантовой яме и/или слое с квантовыми точками в полупроводниковой барьерной структуре. Математическое соотношение устанавливает взаимосвязь между спектральной плотностью мощности низкочастотного шума и энергией активации процесса эмиссии носителей заряда с энергетических уровней размерного квантования в квантовой яме и/или слое с квантовыми точками.

2. Разработана и апробирована комплексная методика исследования энергетического спектра электронных состояний в полупроводниковых микроструктурах и наноструктурах с квантовыми ямами, основанная на совместном измерении температурной зависимости спектров низкочастотного шума, вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик. Методика позволяет исследовать генерацию низкочастотного шума в локальных областях и заданной квантово-размерной части исследуемого образца – полупроводниковой структуры с квантовыми ямами и определять энергию активации процесса эмиссии носителей заряда с уровней размерного квантования.

3. Разработан аппаратно-программный комплекс спектроскопии низкочастотных шумов, спектроскопии адмиттанса, методов вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик в температурном диапазоне 7-500 К, позволяющий исследовать электрофизические свойства полупроводниковых микроструктур и наноструктур с квантовыми ямами.

4. Разработаны алгоритмы проведения исследования и программного обеспечения для измерительного комплекса, методики исследования энергетического спектра электронных состояний в полупроводниковых микроструктурах и наноструктурах с квантовыми ямами, основанной на совместном использовании спектроскопии низкочастотного шума и измерений температурной зависимости вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик.

5. Определены величины энергии активации процесса эмиссии электронов с основного уровня размерного квантования из квантовой ямы 148 ± 20 мэВ в гетероструктуре $\text{In}_{0,22}\text{Ga}_{0,78}\text{As}/\text{GaAs}$, энергии активации процесса эмиссии дырок 487 ± 20 мэВ из слоя квантовых точек InAs в наногетероструктуре с множественными квантовыми ямами и погруженными в них слоями квантовых точек на основе системы $\text{InAs}/\text{In}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}/\text{GaAs}$ (DUWELL), предназначенной для изготовления лазера с рабочей длиной волны 1,3 мкм, по температурным зависимостям спектров низкочастотных

шумов. Рассчитанная энергия активации эмиссии электронов 148 мэВ коррелирует с положением основного уровня размерного квантования электронов в КЯ в диодной структуре на основе гетероперехода $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{GaAs}$. Полученные данные подтверждены независимым способом DLTS (155 ± 20 и 483 ± 20 мэВ соответственно).

6. Проведены измерения вольт-амперных характеристик и спектральной плотности мощности низкочастотного шума на образцах $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ при разных температурах и напряжениях в фазах аморфного и кристаллического состояния. Обнаружена зависимость спектральной плотности мощности низкочастотного шума от электрического напряжения и температуры в микроструктурах на основе тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ с содержанием Bi 0, 1 и 3 %. Введение небольшой доли Bi (1 масс. %) снижает значение шума в пленках GST225, что характерно для более упорядоченной структуры. Изменение структуры тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, легированных Bi, при переходе из аморфного состояния в кристаллическое приводит к увеличению значений спектральной плотности мощности низкочастотного шума в 10-100 раз.

Список основных публикаций

Статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК

1. Ермачихин А.В., Кострюков С.А., Литвинов В.Г., Рыбин Н.Б. Исследование шумовых свойств и электронных состояний диода Шоттки на основе гетероструктуры $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ с квантовой ямой // Вестник РГРТУ. – 2012. – № 3 (41). – С. 98-103.
2. Литвинов В.Г., Ермачихин А.В., Кусакин Д.С. DLTS исследование диода Шоттки на основе гетероструктуры $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ с квантовой ямой // Вестник РГРТУ. – 2013. – № 2 (44). – С. 91-96.
3. Холомина Т.А., Кострюков С.А., Литвинов В.Г., Ермачихин А.В. Спектроскопия низкочастотных шумов полупроводниковых приборов // Датчики и системы. – 2013. – № 5. – С. 15-21.
4. Кострюков С.А., Ермачихин А.В., Литвинов В.Г., Холомина Т.А., Рыбин Н.Б. Измерительный комплекс спектроскопии низкочастотных шумов полупроводниковых диодных структур // Измерительная техника. – 2013. – № 9. – С. 61-64.
5. Ермачихин А.В., Литвинов В.Г. LabVIEW в современной индустрии измерений (обзор) // Информационные технологии. – 2014. – № 3. – С. 25-29.
6. Зубков В.И., Яковлев И.Н., Литвинов В.Г., Ермачихин А.В., Кучерова О.В., Черкасова В.Н. Анализ электростатического взаимодействия зарядов в множественных квантовых ямах $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ методами спектроскопии адмиттанса // ФТП. – 2014. – Том 48, вып. 7. – С. 944-950.

7. Корнилович А.А., Литвинов В.Г., Ермачихин А.В., Кусакин Д.С. Установка для определения параметров полупроводниковых структур по магнитным квантовым эффектам и спектроскопии адмиттанса // Приборы и техника эксперимента. – 2014. – № 4. – С. 111-119.

8. Лазаренко П.И., Козюхин С.А., Шерченков А.А., Литвинов В.Г., Ермачихин А.В., Нгуен Х.Ф., Редичев Е.Н. Электрофизические свойства аморфных тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, легированных Bi // Вестник РГРТУ. – 2013. – № 4 (46), часть 3. – С. 83-87.

9. Ермачихин А.В., Кострюков С.А., Кусакин Д.С., Литвинов В.Г., Рыбин Н.Б. Шумовая спектроскопия диода Шоттки на основе гетероструктуры $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ с квантовой ямой // Вестник РГРТУ. – 2014. – № 3 (49). – С. 83-89.

Статьи в переводных изданиях

1. A measuring System for the Spectroscopy of the Low-Frequency Noise of Semiconductor Diode Structures // Measurement Techniques. – 2013. – Vol. 56. Iss. 9. – P. 1066-1071.

2. Apparatus for Determining Parameters of Semiconductor Structures by Magnetic Quantum Effects and Admittance Spectroscopy // Instruments and Experimental Techniques. – 2014. – Vol. 57. No. 4. – P. 479-487.

3. Analysis of the electrostatic interaction of charges in multiple $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ quantum wells by admittance-spectroscopy methods // Semiconductors. – 2014. – Vol. 48. Iss. 7. – P. 917-923.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

1. Программа для автоматизированного измерения НЧ шумов и спектральной плотности мощности шума в элементах электронной техники: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012617503, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 20 августа 2012 г. / Ермачихин А.В., Литвинов В.Г., Кострюков С.А., Мальченко С.И.

2. Программа алгоритма нахождения оптимального числа усреднений: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013616399, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 8 июля 2013 г. / Ермачихин А.В.

3. Программа управления измерительно-аналитическим комплексом иммитансных характеристик полупроводниковых микро- и наноструктур: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014610621, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 15 января 2014 г. / Ермачихин А.В., Литвинов В.Г., Рыбин Н.Б.

4. Программа для автоматизированного комплекса спектроскопии НЧ шумов: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014617224, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 15 июля 2014 г. / Ермачихин А.В., Рыбин Н.Б., Литвинов В.Г., Рыбина Н.В.

5. Программа для автоматизированного измерения вольт-амперных характеристик полупроводниковых микро- и наноструктур: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014617225, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 15 июля 2014 г. / Ермачихин А.В., Литвинова В.С., Кусакин Д.С.

Тезисы докладов научных конференций

1. Ермачихин А.В., Кострюков С.А., Литвинов В.Г., Рыбин Н.Б. Исследование низкочастотного шума в диоде Шоттки с квантовой ямой на основе Au/GaAs/InGaAs/GaAs // Сборник трудов VIII Международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники». – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 163-164.

2. Ермачихин А.В. Оценка погрешности измерительной методики спектроскопии низкочастотного шума для диагностики наноструктур // Труды V Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур». – Т. III. – Рязань, 2012. – С. 42-49.

3. Ермачихин А.В., Литвинов В.Г., Мальченко С.И. Программное обеспечение измерительной установки для низкочастотной спектроскопии // Инженерные и научные приложения на базе National Instruments-2012. Сборник трудов XI Международной научно-практической конференции. – М.: ДМК Пресс, 2012. – С. 387-389.

4. Ермачихин А.В., Литвинов В.Г., Рыбин Н.Б., Кострюков С.А. Исследование шумовых свойств диода Шоттки с квантовой ямой // Флуктуационные и деградационные процессы в полупроводниковых приборах: материалы докладов научно-методического семинара. – М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, НИУ «МЭИ», 2012. – С. 98-106.

5. Ермачихин А.В., Кострюков С.А., Литвинов В.Г. Усовершенствование входного усилителя измерительно-аналитического комплекса спектроскопии низкочастотного шума // Труды VI Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур». – Т. III. – Рязань, 2013. – С. 51-54.

6. Ермачихин А.В., Литвинов В.Г. Виды спектров шума (цвет шума) и уменьшение «вредной» составляющей СПМ шума // Труды Всероссийской молодежной школы-семинара «Диагностика наноматериалов и наноструктур». – Рязань, 2013. – С. 58-62.

7. Зубков В.И., Яковлев И.Н., Литвинов В.Г., Ермачихин А.В., Кучерова О.В., Черкасова В.Н. Анализ поведения уровней размерного квантования в квантовых ямах методами вольт-фарадного профилирования // Труды Всероссийской молодежной школы-семинара «Диагностика наноматериалов и наноструктур». – Рязань, 2013. – С. 128-132.

8. Ермачихин А.В., Зубков В.И., Кучерова О.В., Литвинов В.Г., Черкасова В.Н., Яковлев И.Н. Анализ аномального заполнения множественных квантовых ям в системе InGaAs/GaAs методами спектроскопии адмиттанса // Тезисы докладов XI Российской конференции по физике полупроводников (XI РКФП). – СПб.: Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, 2013. – С. 431.
9. Ермачихин А.В., Литвинов В.Г. Программное обеспечение измерительно-аналитического комплекса для исследования иммитанса электронных элементов в температурном диапазоне 7-500 К // Сборник трудов XII Международной конференции компании National Instruments «Инженерные и научные приложения на базе технологии National Instruments – 2013». – Москва, 2013. – С. 260-262.
10. Литвинов В.Г., Ермачихин А.В., Кусакин Д.С. Особенности исследования диода Шоттки на основе гетероструктуры InGaAs/GaAs с квантовой ямой методом DLTS // Труды VI Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур». – Т. III. – Рязань, 2013. – С. 169-175.
11. Лазаренко П.И., Ермачихин А.В. Механизмы переноса заряда в аморфных тонких пленках системы Ge-Sb-Te-Bi // Доклады 21-й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Микроэлектроника и информатика 2014». – М.: МИЭТ, 2014. – С. 40.
12. Ермачихин А.В., Кострюков С.А., Литвинов В.Г. Разработка методики исследования характеристик полупроводниковых структур с квантовыми ямами с использованием спектроскопии НЧ шума // Сборник трудов IX Международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники». – СПб, 2014. – С. 313-314.
13. Лазаренко П.И., Шерченков А.А., Козюхин С.А., Литвинов В.Г., Ермачихин А.В., Громов Д.Г., Редичев Е.Н. Особенности влияния модифицирующей примеси висмута на свойства $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ // Сборник трудов IX Международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники». – СПб, 2014. – С. 265-266.
14. Литвинов В.Г., Ермачихин А.В. Особенности применения спектроскопии низкочастотного шума для диагностики полупроводниковых диодных структур с квантовой ямой // Труды VII Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур». – Т. I. – Рязань, 2014. – С. 37-50.
15. Ермачихин А.В., Литвинов В.Г., Лазаренко П.И. Исследование спектральной плотности мощности шума $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ // Труды VII Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур». – Т. III. – Рязань, 2014. – С. 166-179.

Ермачихин Александр Валерьевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУР
НА ОСНОВЕ СИСТЕМ InGaAs/GaAs, InAs/InGaAs/GaAs
И МИКРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЯ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$
МЕТОДОМ СПЕКТРОСКОПИИ НИЗКОЧАСТОТНОГО ШУМА

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать _____ Формат бумаги 60×84 1/16.
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.
Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.