

На правах рукописи



Рыбин Николай Борисович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУР
МЕТОДАМИ ТОКОВОЙ РЕЛАКСАЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ,
АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ И СПЕКТРОСКОПИИ НЧ-ШУМОВ**

01.04.10 – Физика полупроводников

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико–математических наук

Рязань 2011

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

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Вихров Сергей Павлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Андреев Владимир Викторович

кандидат физико-математических наук
Здоровейцев Антон Владимирович

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук
Институт общей и неорганической химии
им. Н.С. Курнакова (г. Москва)

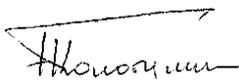
Защита диссертации состоится "20" декабря 2011 года в 12⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.211.03 в ФГБОУ ВПО "Рязанский государственный радиотехнический университет" по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан " " ноября 2011 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета,



д.т.н., проф. Колотилин Б.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

В последние десятилетия наблюдается интенсивное развитие полупроводниковых нанотехнологий. Наноразмерные структуры нашли широкое практическое применение в качестве активной области для лазерных излучателей, оптических усилителей, модуляторов светового излучения, устройств памяти и др.

Функционирование приборов наноэлектроники, активной областью которых являются полупроводниковые гетероструктуры, содержащие квантовые ямы (КЯ) и квантовые точки (КТ), основано на сложных физических явлениях, связанных с размерным квантованием носителей заряда и статистической природой распределения геометрических размеров нанообъектов. Для изучения свойств таких структур требуются использование новейших разработок в области измерительного и диагностического оборудования, а также совершенствование экспериментальных методик и соответствующего математического аппарата для обработки и интерпретации результатов измерений.

Широкое распространение получили методы визуализации нанообъектов с использованием электронной, сканирующей зондовой микроскопии [1]. Однако важнейшими параметрами наноструктур являются: распределение концентрации легирующей примеси и основных носителей заряда, положение энергетических уровней размерного квантования, качество гетерограниц, величины разрывов разрешенных энергетических зон на гетерогранице. Для исследования глубоких уровней в полупроводниковых барьерных микро- и наноструктурах широко применяются электрические методы, такие как спектроскопия адмиттанса, вольт-фарадных характеристик [2], релаксационная спектроскопия глубоких уровней (РСГУ) [3], спектроскопия низкочастотных (НЧ) шумов [4].

К недостаткам метода спектроскопии адмиттанса следует отнести меньшую по сравнению с РСГУ чувствительность по концентрации ГУ и большую погрешность определения энергии ионизации ГУ из-за необходимости проведения в ряде случаев модельных расчетов [5, 6]. Спектроскопия НЧ-шумов на сегодняшний день имеет достаточно ограниченное применение для исследования полупроводниковых наноструктур из-за сложностей проведения эксперимента [7]. Кроме этого, отсутствует теория, позволяющая из спектров НЧ-шумов получить данные о концентрации дефектов с ГУ. Однако спектроскопия НЧ-шумов имеет ряд преимуществ, например не требует использования образцов с обязательным наличием барьерного контакта. В связи с этим развитие метода спектроскопии НЧ-шума для исследования полупроводниковых наноструктур является актуальной задачей.

Наиболее предпочтительным среди перечисленных методов следует считать метод РСГУ. Достоинствами РСГУ-метода являются высокая чув-

ствительность по концентрации глубоких энергетических уровней N_t ($N_t/N_m = 10^{-7} \dots 10^{-5}$, где N_m – концентрация мелкой легирующей примеси), возможность независимого определения энергии ионизации глубокого уровня (ГУ) и сечения захвата (СЗ) носителей заряда (НЗ), высокая разрешающая способность по энергии ионизации ГУ, наглядность измерения и обработки спектров [8]. Токовый вариант РСГУ (ТРСГУ) обладает большей чувствительностью по концентрации дефектов с ГУ по сравнению с традиционным – емкостным вариантом РСГУ. Кроме того, метод РСГУ, в котором изучается температурная зависимость релаксации емкости барьерной структуры, не пригоден для исследования высокоомных полупроводниковых барьерных структур.

Однако все перечисленные известные электрические методы исследования наноструктур рассчитаны на изучение образцов с макроконтактами, т.е. позволяют получать информацию, усредненную по области наблюдения, определяемую площадью барьерного или омического контакта, которая значительно превышает характерные латеральные масштабы в наноструктуре – размеры квантовых точек, протяженность неоднородностей толщины и областей с различным составом твердого раствора материала квантовой ямы и т.д.

По мере развития нанoeлектроники появилась необходимость исследования энергетического спектра электронных состояний в отдельных нанообъектах или их небольших группах. Для обнаружения нанообъекта или соответствующей малой области для исследования и формирования контакта можно использовать атомно-силовой микроскоп (АСМ) и его проводящий зонд, который можно подключить к РСГУ-спектрометру. Разработка физических основ такого метода исследования, основанного на совместном использовании техники АСМ и РСГУ, является актуальной задачей. Релаксационная спектроскопия совместно с атомно-силовой микроскопией позволит определять основные электронные свойства полупроводниковых наногетероструктур, а именно: энергии активации процессов эмиссии и захвата носителей заряда на основные уровни размерного квантования, величины разрывов разрешенных энергетических зон на гетерограницах, макро- и микронеоднородности распределения указанных величин и т.д.

Полупроводники на основе соединений A_2B_6 относятся к одним из основных материалов для оптоэлектронных применений и нанoeлектроники [9, 10]. Однако до сих пор для ряда гетероструктур на основе селенидов, сульфидов цинка, кадмия, магния с квантовыми ямами и точками отсутствуют надежные данные об особенностях зонных диаграмм, а именно о величинах разрывов валентной зоны и зоны проводимости. Изучение электрофизических свойств указанных структур также является актуальной задачей микро- и нанoeлектроники.

Цель диссертационной работы – исследование электрофизических свойств полупроводниковых наногетероструктур с квантовыми ямами и квантовыми точками с учетом квантово-размерных эффектов и развитие методов диагностики на основе токовой релаксационной спектроскопии, атомно-силовой микроскопии и спектроскопии НЧ-шумов.

Основные задачи

1. Анализ существующих методов исследования энергетического спектра электронных состояний в полупроводниковых микро- и наноструктурах.

2. Вывод основных математических соотношений, учитывающих конфигурацию барьерного контакта и исследуемой полупроводниковой микро- или наноструктуры, для метода исследования энергетического спектра электронных состояний в полупроводниковых наногетероструктурах, основанного на совместном использовании токовой релаксационной спектроскопии и атомно-силовой микроскопии (АСМ).

3. Исследование энергетического спектра электронных состояний в полупроводниковых наноструктурах с квантовыми точками, величин разрывов разрешенных энергетических зон в наноструктурах с квантовой ямой, изучение распределения этих величин вдоль поверхности образцов, параллельной слою, образующему квантовую яму, при формировании точечного барьерного контакта с размерами ≤ 100 нм с помощью метода, основанного на совместном использовании ТРСГУ и АСМ.

4. Изучение величин разрывов разрешенных энергетических зон в полупроводниковых наногетероструктурах с квантовой ямой методом спектроскопии НЧ-шумов.

Основными объектами исследований являлись полупроводниковые гетероструктуры с квантовыми ямами (КЯ) на основе систем InGaAs/GaAs, ZnCdS/ZnSSe и гетероструктуры с квантовыми точками (КТ) на основе системы CdSe/ZnSe, выращенные либо методом эпитаксии из молекулярных пучков (МПЭ), либо методом парофазной эпитаксии из металлорганических соединений (ПФЭМОС).

Научная новизна представленных в работе результатов заключается в следующем:

1. Впервые предложен способ исследования энергетического спектра электронных состояний в полупроводниковых наногетероструктурах, а именно в их областях, размеры которых находятся в нанометровом диапазоне, основанный на изучении температурной зависимости релаксации электрического тока через структуру при совместном использовании токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней и атомно-силовой микроскопии.

2. Получены математические соотношения, описывающие переходный процесс релаксации тока при опустошении энергетических уровней в полупроводниковой структуре с точечным барьерным контактом. Матема-

тические соотношения описывают релаксацию тока в структурах с квантовыми ямами или квантовыми точками.

3. Экспериментально определена энергия активации процесса эмиссии электронов из квантовых точек в структуре CdSe/ZnSe по температурной зависимости релаксации тока через структуру с помощью метода, основанного на совместном использовании ТРСГУ и АСМ.

4. Впервые экспериментально обнаружена флуктуация величины разрыва зоны проводимости вдоль слоя, образующего квантовую яму в гетероструктуре $Zn_{0.4}Cd_{0.6}S/ZnS_{0.06}Se_{0.94}$, с помощью совместного использования токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней и атомно-силовой микроскопии (локальной токовой релаксационной спектроскопии).

5. Впервые определена энергия активации процесса эмиссии носителей заряда с основного уровня размерного квантования методом спектроскопии НЧ-шумов и рассчитана величина разрыва зоны проводимости в гетероструктуре $In_{0.22}Ga_{0.78}As/GaAs$.

Положения и результаты, выносимые на защиту

1. Математические соотношения, учитывающие конфигурацию барьерного контакта и исследуемой полупроводниковой микро- или наноструктуры, в комбинированном методе токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней и атомно-силовой микроскопии.

2. Способ локального измерения энергетического спектра электронных состояний, основанный на совместном использовании токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней и атомно-силовой микроскопии, который позволяет определять распределение величины энергии активации носителей заряда по поверхности образца.

3. Результаты измерения разрыва зоны проводимости в структуре $In_{0.22}Ga_{0.78}As/GaAs$ с квантовой ямой, полученные методом спектроскопии НЧ-шумов с учетом эффектов Пула - Френкеля и туннелирования.

Достоверность научных результатов работы обеспечивается использованием общепринятого математического аппарата физики полупроводников и подтверждается совпадением с результатами исследований, полученных независимыми методами: фото- и катодолюминесценции (КЛ), токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней, спектроскопии НЧ-шумов.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

- развиты методы РСГУ и АСМ, углублены существующие представления о физических процессах, происходящих в полупроводниковых наногетероструктурах, перспективных для применения в опто- и наноэлектронике;

- разработан способ локального исследования энергетического спектра электронных состояний в полупроводниковых наногетероструктурах и объектах, имеющих размеры нанометрового диапазона, который позволяет

определять основные параметры их зонных диаграмм или электронного спектра;

- разработан способ расчета величин разрывов разрешенных зон в структурах с квантовыми ямами по спектру релаксационной спектроскопии глубоких уровней, учитывающий эффект туннелирования носителей заряда сквозь потенциальный барьер треугольной формы;

- экспериментально определены величины разрывов разрешенных зон в наногетероструктурах $\text{In}_{0,22}\text{Ga}_{0,78}\text{As}/\text{GaAs}$, $\text{Zn}_{0,4}\text{Cd}_{0,6}\text{S}/\text{ZnS}_{0,06}\text{Se}_{0,94}$ с квантовыми ямами и значения энергии активации электронов с основного уровня размерного квантования в квантовой точке в структурах CdSe/ZnSe .

Апробация. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XII международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты» (г. Алушта, 2008), X, XI, XII международных конференциях «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы» (г. Ульяновск, 2008, 2009, 2010), III международной конференции «Физика электронных материалов – ФИЭМ'08» (г. Калуга, 2008), VII международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники» (г. Санкт-Петербург, 2010), I и II Всероссийских школах-семинарах студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Наноинженерия» (г. Москва, г. Калуга; 2008, 2009), I и III Всероссийских школах-семинарах студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Наноматериалы» (г. Рязань, 2008, 2010), Всероссийской школе-семинаре студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур» (г. Рязань, 2011), 14th and 15th International Conference on II-VI Compounds (г. Санкт – Петербург, 2009; Cancun, Mexico, 2011).

Публикации. Основные результаты опубликованы в 36 научных работах, из них 6 статей (по специальности) в журналах из списка ВАК, 1 статья в зарубежном журнале, 6 статей в других изданиях, 21 тезис докладов на российских и международных конференциях, 1 патент, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 105 наименований. Диссертация изложена на 157 страницах машинописного текста, содержит 13 таблиц и 61 рисунок.

Внедрение результатов

Полученные экспериментальные результаты использованы при подготовке отчетов о научно-исследовательских работах НИР13–09Г, 26–09; 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** рассматриваются основные параметры дефектов с глубокими уровнями в полупроводниках, а также методы исследования энергетического спектра носителей заряда и дефектов в полупроводниковых микро- и наногетероструктурах. Описаны физические основы методов вольт-фарадных характеристик, спектроскопии адмиттанса, релаксационной спектроскопии глубоких уровней, в том числе с преобразованием Лапласа, спектроскопии низкочастотного шума. Все эти методы ранее применялись для изучения макрообразцов, когда площадь контакта значительно превышала размеры нанообъектов. При этом полученные результаты усредняются по всей площади контакта, и разброс в значениях исследуемых параметров в нанометровом диапазоне не учитывается.

Проведено сравнение этих методов по таким параметрам, как чувствительность по концентрации детектируемых дефектов с глубокими уровнями, разрешающая способность по энергии ионизации и т.п. Выделен метод токовой РСГУ, обладающий высокой чувствительностью по концентрации ГУ. Токовая РСГУ менее требовательна к конфигурации образцов, чем методы исследования, основанные на измерении емкости образцов и требующие наличия покровного слоя определенной толщины при заданном уровне легирования.

Вторая глава посвящена разработке физических основ метода исследования электронных состояний в полупроводниковых наногетероструктурах, основанного на совместном использовании ТРСГУ и АСМ. Обоснован выбор методов ТРСГУ с преобразованием Лапласа и АСМ. Зонд АСМ, покрытый металлической пленкой, формирует точечный барьерный контакт к образцу, имеющий размеры в несколько десятков – сотен нанометров. Это позволяет получать информацию об энергетическом спектре дефектов с глубокими уровнями, электронных состояний в областях, соизмеримых с размерами острия зонда. В АСМ возможно подключение РСГУ-спектрометра непосредственно к проводящему зонду, а также изменение температуры образца, что позволяет исследовать температурную зависимость релаксационных процессов в образце. Использование ТРСГУ с преобразованием Лапласа за счет большого количества усреднений переходных процессов позволяет снизить влияние шумов на результаты измерения энергии ионизации ГУ.

Для правильного выбора режимов измерения и количественного анализа спектров ТРСГУ получены соотношения, описывающие релаксацию тока через точечный барьерный контакт (рис. 1). Для нахождения распределения потенциала решено уравнение Пуассона в сферических координа-

тах (1) для случая равномерного распределения концентрации свободных электронов в полупроводнике n-типа [11]:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\varphi}{dr} \right) = -\frac{eN}{\varepsilon\varepsilon_0}, \quad (1)$$

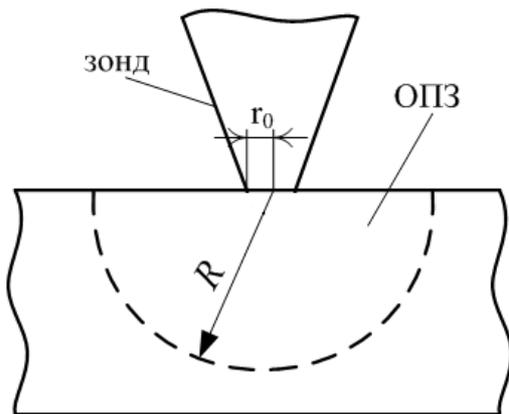
где e – элементарный заряд, ε_0 – абсолютная диэлектрическая постоянная вакуума, ε – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника, N – концентрация мелких доноров, φ – потенциал, r – расстояние от точечного контакта.

Интегрирование уравнения (1) с граничными условиями

$$\varphi(R) = 0,$$

$$\varphi(0) = \varphi_{\max},$$

$$\frac{d\varphi}{dr}(R) = 0,$$



где R – граница области пространственного заряда (ОПЗ), приводит к выражению:

Рисунок 1 – Схематическое изображение точечного барьерного контакта (штриховой линией показан край ОПЗ)

$$\varphi(r) = -\frac{eNr^2}{6\varepsilon\varepsilon_0} - \frac{eNR^3}{3\varepsilon\varepsilon_0 r} + \frac{eNR^2}{2\varepsilon\varepsilon_0}. \quad (2)$$

Уравнение (2) описывает зависимость потенциала в ОПЗ толщиной R от координаты r (рис. 2).

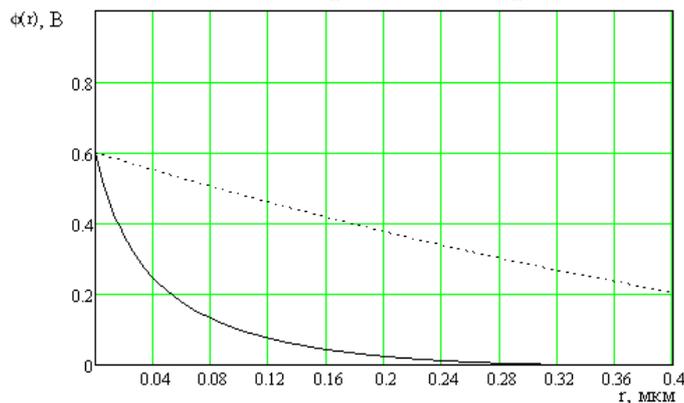


Рисунок 2 – Зависимость потенциала от координаты в ОПЗ для макро- (пунктирная линия) и точечного контакта (сплошная линия)

На рис. 2 изображена рассчитанная зависимость потенциала в ОПЗ полупроводника для точечного барьерного и плоского барьерного контакта. Расчет производился для контакта Шоттки с высотой потенциального барьера 0,6 эВ, уровнем легирования полупроводника $N = 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Таким

образом, видно, что в случае точечного контакта потенциал более резко уменьшается с увеличением расстояния от контакта.

При подаче на структуру, содержащую слой КЯ или КТ, заполняющих и опустошающих импульсов напряжения край ОПЗ (в виде полусферы) будет перемещаться в пределах расстояний от r_1 до r_2 соответственно (рис. 3). При этом область КЯ, в которой будет осуществляться перезарядка энергетического уровня в КЯ, будет иметь кольцеобразную форму (заштрихованная область на рис. 3), что необходимо учитывать при расчете концентрации НЗ, участвующих в перезарядке КЯ.

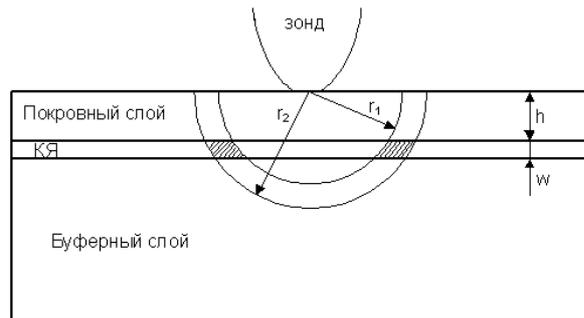


Рисунок 3 – Структура с КЯ и точечным барьерным контактом в разрезе

На рис. 3 величины r_1 и r_2 соответствуют положению края ОПЗ при разных напряжениях на структуре.

Ток релаксации при перезарядке ГУ в структуре с точечным барьерным контактом определяется как:

$$i(t) = \frac{2\pi \cdot e N_t}{\tau} \left[\frac{(r_2 - \lambda)^3 - (r_1 - \lambda)^3}{3} - \frac{(r_2 - \lambda)^4 - (r_1 - \lambda)^4}{4r_2} \right] \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (3)$$

где r_2 и r_1 – толщина ОПЗ при действии опустошающего и заполняющего импульсов напряжения соответственно, λ – расстояние от края ОПЗ в полупроводнике до места пересечения квазиуровня Ферми с глубоким уровнем E_t , N_t – концентрация НЗ, покидающих глубокий уровень в результате термической эмиссии, τ – время релаксации, определяемое энергией ионизации ГУ, t – время. Сомножитель в квадратных скобках пропорционален объему полупроводника, в котором происходит перезарядка глубокого уровня.

При наличии в базе точечного диода квантовой ямы, как на рис. 3, в перезарядке участвует только заштрихованная область КЯ, поэтому ток релаксации определяется выражением:

$$i(t) = \frac{\pi e N_{qw}}{3\tau} [w(r_2 - r_1)(5(r_2 + r_1) - 4w - 8h)] \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (4)$$

где N_{qw} – концентрация носителей заряда в КЯ в соответствующей минизо-не размерного квантования, w – толщина слоя, образующего КЯ, h – толщина покровного слоя.

Таким образом, получены соотношения, описывающие процесс релаксации тока в точечной барьерной структуре. Разработана схема экспе-

риментальной установки на базе ТРСГУ-спектрометра и атомно-силового микроскопа для проведения исследований температурной зависимости релаксации тока в точечных барьерных структурах, в которых барьерный контакт формируется зондом АСМ.

В третьей главе представлены результаты исследования энергетического спектра электронов в нанометровой области на структурах $Zn_{0,4}Cd_{0,6}S/ZnS_{0,06}Se_{0,94}$ с КЯ и CdSe/ZnSe с КТ.

Образцы исследовались методами катодолюминесценции, токовой РСГУ и токовой РСГУ с преобразованием Лапласа (ЛТРСГУ) совместно с АСМ. В результате апробации метода ЛТРСГУ совместно с АСМ были исследованы процессы релаксации тока в образцах (рис. 4) при нескольких фиксированных температурах.

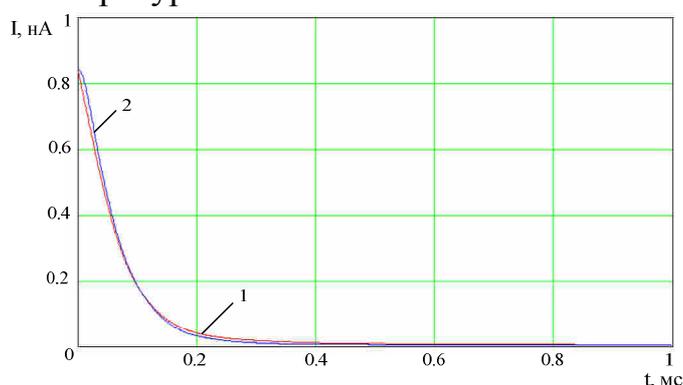


Рисунок 4 – Сигналы релаксации тока через образец CdSe/ZnSe с КТ для двух температур: 1 – 295 К, 2 – 320 К

По ЛТРСГУ-спектрам определялись скорости эмиссии носителей заряда при разных температурах (рис. 5).

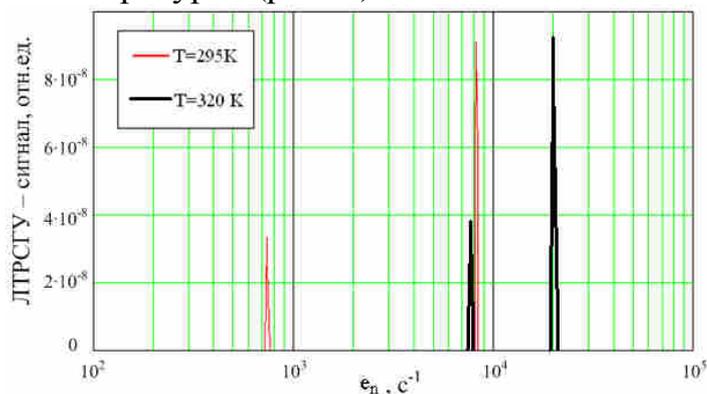


Рисунок 5 – ЛТРСГУ-спектр образца CdSe/ZnSe с КТ

По температурным зависимостям скоростей эмиссии были рассчитаны энергии активации, которые составляли 220 ± 20 и 620 ± 20 мэВ. Значения энергий совпадали с результатами КЛ- и ТРСГУ-измерений. Контрольные измерения ТРСГУ-спектров на образце с буферным слоем ZnSe не показали наличие переходного процесса с постоянной времени релаксации, соответствующей энергии 620 мэВ. Это позволило сделать вывод, что обнару-

женный релаксационный процесс в образце с КТ обусловлен эмиссией электронов из КТ.

ЛТРСГУ-спектры были получены для образца $\text{Zn}_{0,4}\text{Cd}_{0,6}\text{S}/\text{ZnS}_{0,06}\text{Se}_{0,94}$ с КЯ. Энергии активации процесса эмиссии электронов из КЯ составили $E_a = 340 \pm 20$ мэВ в центре образца и 380 ± 20 мэВ на краю. При исследовании контрольного образца только с буферным слоем $\text{ZnS}_{0,06}\text{Se}_{0,94}$ при тех же условиях измерения такого пика на ЛТРСГУ-спектре не обнаружено. Величина E_a коррелирует с данными, полученными из спектров КЛ и ТРСГУ.

В предположении о прямоугольном профиле КЯ и в приближении эффективной массы электронов $m_n = 0,2 \cdot m_0$ была рассчитана энергия основного уровня размерного квантования электронов в КЯ $E_{e1} = 45$ мэВ. Разрыв зоны проводимости рассчитан как $\Delta E_C = E_t + \Delta E_{F-P} + E_{e1}$, где $\Delta E_{F-P} = 6$ мэВ – понижение потенциального барьера для электронов, возникающее из-за изгиба зон под действием электрического поля, равного $2 \cdot 10^4$ В/см. В центральной части образца разрыв зоны проводимости составил $\Delta E_C = 391 \pm 20$ мэВ, а на краю $\Delta E_C = 431 \pm 20$ мэВ. Флуктуация величины разрыва зоны проводимости составила 40 мэВ.

Таким образом, в работе были выполнены локальные измерения энергий активации процесса эмиссии НЗ из КТ в наноструктуре CdS/ZnSe , разрыва зоны проводимости в наноструктуре $\text{ZnCdS}/\text{ZnSSe}$ с одиночной КЯ. Впервые продемонстрирована эффективность использования метода ЛТРСГУ совместно с техникой АСМ для изучения процессов эмиссии НЗ в полупроводниковых наноструктурах.

В четвертой главе представлены результаты измерения энергии активации эмиссии НЗ из КЯ с помощью метода спектроскопии НЧ-шумов. В работе исследовалась диодная структура $\text{In}_{0,22}\text{Ga}_{0,78}\text{As}/\text{GaAs}$ с КЯ. Гетероструктуры $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ перспективны для применения в качестве активной области полупроводниковых лазеров, излучающих в ИК области спектра, что делает их привлекательными для использования в различного рода датчиках. Кроме того, технология выращивания таких структур методом МПЭ достаточно хорошо отработана. Исследованная структура обладала низкой концентрацией дефектов, что позволило использовать ее для апробации метода спектроскопии НЧ-шумов и интерпретации полученных результатов.

Для проверки результатов, полученных методом спектроскопии НЧ-шумов, образец исследовался методами фотолюминесценции и ТРСГУ. Выбор напряжений, при которых производились измерения, осуществлялся на основе данных, полученных из измерения С-V-характеристик.

Зависимости спектральной плотности мощности (СПМ) НЧ-шума от частоты f , полученные экспериментально, представлены на рис. 6. Резкое изменение зависимости СПМ наблюдается для частот выше 400 Гц. С использованием этого значения частоты из выражения (5) вычислялась энергия активации носителей заряда ΔE_t [12]:

$$\Delta E_i = kT \ln \left(\frac{1}{4\pi f_b \cdot \tau_m} \right), \quad (5)$$

где f_b - частота излома на частотной зависимости СПМ НЧ шума, τ_m - время максвелловской релаксации в электронейтральной области образца.

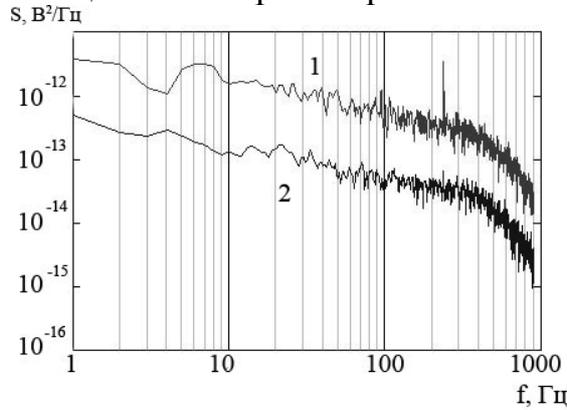


Рисунок 6 - Зависимости СПМ от частоты при двух напряжениях смещения для структуры, содержащей квантовые ямы; кривая 1 - напряжение смещения -2,5 В, кривая 2 – -2 В

Вычисленная величина $f_b = 453$ Гц позволила получить значение энергии ионизации $\Delta E_i = 96 \pm 5$ мэВ.

Для определения величины разрыва зоны проводимости рассчитано положение основного уровня размерного квантования в предположении прямоугольной КЯ, а также учтено понижение потенциального барьера для электронов вследствие эффектов Пула - Френкеля и туннелирования, проявляющихся при подаче обратного напряжения на структуру. Понижение потенциального барьера происходит под действием электрического поля напряженностью около 10^5 В/см.

Положение основного уровня размерного квантования составило 52 мэВ от дна КЯ. Понижение высоты потенциального барьера для электронов ΔE_{F-P} (рис. 7, а), возникающего из-за эффекта Пула – Френкеля, в образце при выбранном обратном напряжении $U_R = -2,5$ В составило $\Delta E_{F-P} = 29$ мэВ.

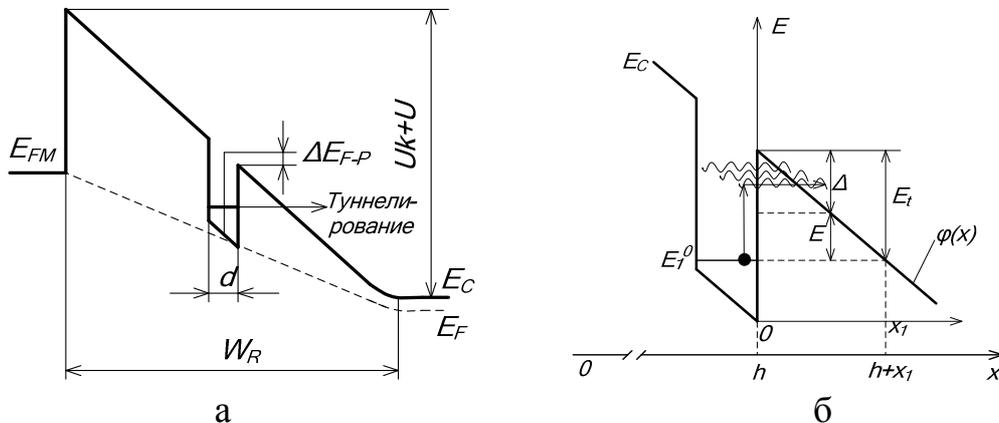


Рисунок 7 – Положение края зоны проводимости в образце с квантовой ямой в слое ОПЗ (а); участок дна зоны проводимости вблизи КЯ (б)

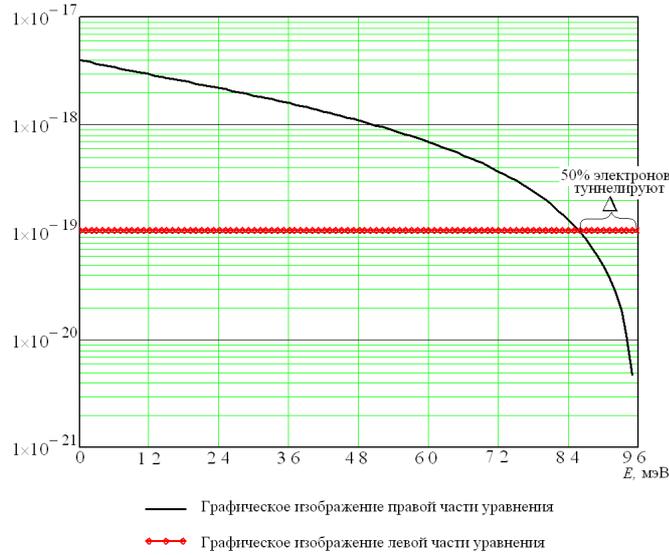


Рисунок 8 – Графическое изображение левой и правой части уравнения (6)

Для учета эффекта туннелирования определялась высота потенциального барьера, на которой он становится туннельно-прозрачным для 50 % электронов (рис 7, б). Для этого решалось следующее уравнение:

$$-\frac{\hbar}{2\sqrt{2m_n}} \ln \frac{D}{D_0} = \int_0^{x_1} \sqrt{\frac{e^2 N}{2\epsilon\epsilon_0} [d_n - (x + h)]^2 - (E_t - \Delta)} dx, \quad (6)$$

где D – коэффициент прозрачности потенциального барьера, \hbar - редуцированная постоянная Планка, N – концентрация легирующей примеси, m_n^* - эффективная масса электрона, d_n – толщина ОПЗ, e – заряд электрона, D_0 – коэффициент, принимаемый в расчетах равным 1.

На рис. 8 представлено графическое решение уравнения (6) для исследуемого образца. Из рис. 8 видно, что сквозь верхнюю часть потенциального барьера высотой $\Delta = 10$ мэВ туннелируют 50 % электронов, возбужденных с уровня E_I^0 (рис. 7). Таким образом, разрыв зоны проводимости с учетом положения уровня размерного квантования и понижения потенциального барьера составил $\Delta E_C = 187 \pm 5$ мэВ.

Совпадение величины энергии активации электронов из КЯ с величиной, полученной методом ТРСГУ ($\Delta E_t = 93 \pm 10$ мэВ), подтверждает достоверность результатов, получаемых методом спектроскопии НЧ-шумов.

В заключении сформулированы основные выводы.

Основные выводы

1. Получены математические соотношения, учитывающие конфигурацию барьерного контакта и исследуемой полупроводниковой микро- или наноструктуры, для метода локальной токовой релаксационной спектроскопии полупроводниковых микро- и наноструктур, основанного на совместном использовании ТРСГУ и АСМ. Математические соотношения

описывают релаксацию тока через точечный барьерный контакт полупроводниковой структуры, для формирования которого используется зонд атомно-силового микроскопа.

2. Разработан способ локального измерения энергетического спектра электронных состояний, основанный на совместном использовании токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней и атомно-силовой микроскопии, который позволяет по температурной зависимости релаксации тока исследовать энергетический спектр электронных состояний в областях микро- и наноструктур, размеры которых определяются радиусом закругления зонда АСМ. Получен патент на способ исследования энергетического спектра электронных состояний и устройство для его осуществления № 2415389.

3. Апробирован метод локальной токовой релаксационной спектроскопии. В структуре CdSe/ZnSe с квантовыми точками по температурной зависимости релаксации тока через структуру экспериментально определена энергия активации процесса эмиссии электронов из квантовых точек. Значение энергии активации в пределах погрешности совпадает со значением, полученным методом ТРСГУ.

4. Разработан способ нахождения распределения величины энергии активации носителей заряда по поверхности исследуемой полупроводниковой микро- или наноструктуры, основанный на совместном использовании токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней и атомно-силовой микроскопии. В структуре $Zn_{0.4}Cd_{0.6}S/ZnS_{0.06}Se_{0.94}$ с квантовой ямой измерены величины разрыва зоны проводимости в разных точках поверхности образца размерами 5x5 мм. Величина разрыва зоны проводимости изменялась от 391 до 431 мэВ. Использование данного метода позволяет оценивать качество гетероструктур.

5. Впервые методом спектроскопии НЧ-шумов определена величина энергии активации электронов с основного уровня размерного квантования в структуре $In_{0.22}Ga_{0.78}As/GaAs$ с квантовой ямой. По энергии активации электронов рассчитана величина разрыва зоны проводимости для структуры $In_{0.22}Ga_{0.78}As/GaAs$, которая составила 187 ± 5 мэВ.

6. Получены соотношения для расчета величины разрыва разрешенной зоны в структуре с квантовой ямой по спектру релаксационной спектроскопии глубоких уровней или спектру НЧ-шумов, учитывающие эффект туннелирования носителей заряда сквозь потенциальный барьер треугольной формы и эффекта Пула - Френкеля. Данный эффект начинает сказываться на результатах расчета разрыва разрешенной зоны при увеличении напряженности электрического поля свыше 10^4 В/см. Так, например, в структуре $In_{0.22}Ga_{0.78}As/GaAs$ с квантовой ямой и уровнем легирования $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ величина разрыва зоны проводимости, вычисленная с учетом эффекта туннелирования, составляет 187 мэВ, а без учета туннелирования – 177 мэВ. Таким образом, понижение потенциального барьера для эмис-

сии носителей заряда из квантовой ямы за счет туннелирования электронов составляет 10 мэВ.

Список основных публикаций

1. Литвинов В.Г., Милованова О.А., Рыбин Н.Б. Электрофизические свойства квантово-размерных структур на основе селенидов, сульфидов цинка, кадмия, магния // Приложение к журналу «Вестник РГРТУ». 2009. № 4. Вып.30. С. 39-46.

2. Литвинов В.Г., Гудзев В.В., Милованова О.А., Рыбин Н.Б. Релаксационная спектроскопия глубоких уровней микро- и наноструктур // Вестник РГРТУ 2009. № 4. Вып. 30. С. 62-70.

3. Vladimir Litvinov, Vladimir Kozlovsky, Denis Sannikov, Dmitry Sviridov, Oksana Milovanova, and Nikolay Rybin. Local measurement of conduction band offset for ZnCdS/ZnSSe nanostructure by Laplace current DLTS cooperated with AFM technique // Phys. Status Solidi C, No. 6. 1536–1538 (2010).

4. Литвинов В.Г., Гудзев В.В., Милованова О.А., Рыбин Н.Б. Релаксационная спектроскопия глубоких уровней и ее применение для исследования полупроводниковых структур микро- и нанoeлектроники // Датчики и системы. № 9. 2009. С.71-78.

5. Литвинов В.Г., Милованова О.А., Рыбин Н.Б. Определение концентрации носителей заряда в слаболегированных квантово-размерных структурах с зонной диаграммой второго типа // Вестник РГРТУ 2011. №2. Вып. 36. С. 75-81.

6. Гришанкина Н.В., Литвинов В.Г., Гудзев В.В., Рыбин Н.Б. Исследование диодных структур на основе Si и a-Si:H методом токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней в режимах эмиссии и захвата // Вестник РГРТУ 2011. № 3. Вып. 37. С. 72-80.

7. Литвинов В.Г., Козловский В.И., Милованова О.А., Рыбин Н.Б. Моделирование излучательных переходов в квантово-размерных структурах ZnCdS/ZnSSe с зонной диаграммой второго типа // Вестник РГРТУ 2011. №3. Вып. 37. С. 80-87.

8. Литвинов В.Г., Рыбин Н.Б., Милованова О.А. Особенности структуры Zn_{0.1}Cd_{0.9}S/ZnSe/ZnS_{0.06}Se_{0.94} с одиночной квантовой ямой // XII международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты»: тезисы докладов. Алушта, 2008. С. 86.

9. Литвинов В.Г., Вишняков Н.В., Милованова О.А., Рыбин Н.Б. Практические аспекты применения релаксационной спектроскопии глубоких уровней для характеристики полупроводниковых наноструктур // X международная конференция «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы»: тезисы докладов. Ульяновск, 2008. С. 207.

10. Козловский В.И., Литвинов В. Г., Рыбин Н.Б., Свиридов Д. Е., Санников Д. А. Разрывы энергетических зон в структурах ZnCdS/ZnSSe с одиночной квантовой ямой // Сб. трудов X международной конференции «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы». г. Ульяновск, 2008. С. 206.

11. Литвинов В.Г., Милованова О.А., Рыбин Н.Б. Практические аспекты применения релаксационной спектроскопии глубоких уровней для измерения плотности состояний в неупорядоченных полупроводниках // III международная конференция «Физика электронных материалов – ФИЭМ'08»: Тезисы докладов. Калуга, 2008. С. 275-278.

12. Рыбин Н.Б. Изучение электрофизических свойств наноструктур ZnCdS/ZnSSe с одиночной квантовой ямой // Сб. трудов I Всероссийской школы-

семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Наноинженерия», 10-12 декабря 2008 г., г. Москва. С. 206-208.

13. Литвинов В.Г., Козловский В.И., Милованова О.А., Рыбин Н.Б. Определение разрывов зон в ZnSe/ZnMgSSe структуре методами катодолюминесценции и релаксационной спектроскопии глубоких уровней совместно с атомно-силовой микроскопией // XI международная конференция «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы»: тезисы докладов. Ульяновск, 2009. С. 210-211.

14. Litvinov V.G., Kozlovsky V.I., Sannikov D.A., Sviridov D.E., Milovanova O.A., and Rybin N.B. Local measurement of band offset for ZnCdS/ZnSSe nanostructure by Laplace current DLTS cooperated with AFM technique // 14th International Conference on II-VI Compounds «Program and abstracts». St. Petersburg. Russia. 2009. P. 153.

15. Литвинов В.Г., Гудзев В.В., Гришанкина Н.В., Рыбин Н.Б. Исследование процессов эмиссии и захвата носителей заряда в p-i-n структуре a-Si:H методом токовой DLTS // Сборник трудов VII международной конференции. «Аморфные и микрокристаллические полупроводники». 28 июня- 1 июля 2010 г. Санкт-Петербург. С 237-238.

16. Литвинов В.Г., Козловский В.И., Милованова О.А., Рыбин Н.Б. Разрывы разрешенных энергетических зон в наноструктурах ZnCdS/ZnSSe: теория и эксперимент // Труды XII международной конференции «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы». Ульяновск: УлГУ, 2010. С. 36.

17. Литвинов В.Г., Рыбин Н.Б., Милованова О.А. C-V- профилирование гетероструктуры InGaAs/GaAs с тремя квантовыми ямами // Труды XII международной конференции «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы». Ульяновск: УлГУ, 2010. С. 54.

18. Литвинов В.Г., Рыбин Н.Б. Локальное исследование энергетического спектра носителей заряда в полупроводниковых микро- и наноструктурах методами релаксационной спектроскопии и зондовой микроскопии // Сб. трудов III Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Наноматериалы». Т. 1. 27 сентября - 2 октября 2010 г. Рязань. С. 153-157.

19. Litvinov V.G., Kozlovsky V.I., Sadofyev Yu.G., and Rybin N.B. A local study of the energy spectrum of electrons in CdSe/ZnSe QD structures by current DLTS and AFM // 15th International Conference on II-VI Compounds «Buck of abstracts». Cancun, Mexico, 2011. P. 73.

20. Литвинов В.Г., Рыбин Н.Б. Количественный анализ спектров токовой DLTS при использовании точечного барьерного контакта // Сб. трудов Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур». Т. 3. 12 - 16 сентября 2011 г. Рязань. С. 28-31.

21. Литвинов В.Г., Рыбин Н.Б., Милованова О.А. Локальное исследование энергетического спектра электронов в наногетероструктурах CdSe/ZnSe с квантовыми точками // Сб. трудов Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур». Т. 3. 12 - 16 сентября 2011 г. Рязань. С. 127-129.

22. Кострюков С.А., Литвинов В.Г., Рыбин Н.Б. Спектроскопия НЧ-шумов в полупроводниковых наноструктурах с квантовыми ямами // Сб. трудов Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур», т.3, 12 - 16 сентября 2011 г. Рязань С. 130-132.

23. Вишняков Н.В., Литвинов В.Г., Милованова О.А., Рыбин Н.Б. Способ исследования энергетического спектра электронных состояний и устройство для его осуществления. Патент на изобретение № 2415389.

24. Мальченко С.И., Литвинов В.Г., Вишняков Н.В., Мишустин В.Г., Рыбин Н.Б. Программа для автоматизированного измерения иммитанса прибором Е7-20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011616817.

Список цитируемой литературы

1. Binnig G., Rohrer H. Scanning tunneling microscopy // *Helv. Phys. Acta.* 1982. V. 55. № 6. P. 726 – 735.

2. Берман Л.С. Емкостные методы исследования полупроводников. Л.: Наука, 1972. 104 с.

3. Lang D.V. Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductor // *J Appl. Phys.* 1974. V. 45. No. 7. P. 3023-3032.

4. Букингом М. Шумы в электронных приборах и системах: пер. с англ. М.: Мир, 1986. 276 с.

5. Берман Л.С., Лебедев А.А. Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках. Л.: Наука, 1981. 176 с.

6. Зубков В.И. Диагностика полупроводниковых наногетероструктур методами спектроскопии адмиттанса. СПб.: ООО «Техномедия». Изд-во «Элмор», 2007. 220 с.

7. Кострюков С.А. Влияние электрического поля на процессы формирования низкочастотного шума в барьерах Шоттки: диссертация на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук. Рязань: РГРТУ, 2007.

8. Денисов А.А., Лактюшкин В.Н., Садофьев Ю.Г. Релаксационная спектроскопия глубоких уровней // *Обзоры по электронной технике.* 1985. Сер. 7. Вып. 15(1141). 52 с.

9. Basov N.G., Dianov E.M., Kozlovsky V.I. et al. // *Laser Physics.* 1996. V. 6. P. 608-611.

10. Dremel M., Priller H., Grün M., Klingshirn C., Kažukauskas V. Electrical and optical properties of the CdS quantum wells of CdS/ZnSe heterostructures // *J. Appl. Phys.* 2003. Vol.93. P.6142-6149.

11. Тамм И.Е. Основы теории электричества. М.: Наука, 1976.

12. Орешкин П.Т. Барьерные слои как резонаторы на глубоких центрах // *Известия вузов СССР. Физика.* 1990. № 11.С. 21-25.

Р ы б и н Николай Борисович

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУР
МЕТОДАМИ ТОКОВОЙ РЕЛАКСАЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ
АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ И СПЕКТРОСКОПИИ НЧ-ШУМОВ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 15.11.2011 Формат бумаги 60×84 1/16.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ _____

Рязанский государственный радиотехнический университет

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Отпечатано с оригинал макета

ООО фирма «Интермета»

390000, г. Рязань, ул. Семинарская, 5

тел./факс (4912)25-81-76