

На правах рукописи



Литвинов Владимир Георгиевич

**ЛОКАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР**

Специальность 01.04.10 – Физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Рязань 2019

Работа выполнена на кафедре «Микро- и нанoeлектроника» в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования "Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина"

Научный консультант:

Вихров Сергей Павлович, Заслуженный деятель науки РФ, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБОУ ВО «РГРТУ»

Официальные оппоненты:

Мошников Вячеслав Алексеевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Микро- и нанoeлектроника», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург

Андреев Владимир Викторович, доктор технических наук, профессор кафедры ИУ1-КФ «Проектирование и технология производства электронных приборов», Калужский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Калуга

Анкудинов Александр Витальевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физико-химических свойств полупроводников, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук» (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»), г. Москва

Защита состоится "31" марта 2020 года в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.211.03 в ФГБОУ ВО "Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина" по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

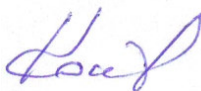
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «РГРТУ»: <http://www.rsreu.ru>.

Автореферат разослан " " 2020 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Д 212.211.03, д.т.н., профессор



Кошелев Виталий Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Научно-технический прогресс сопровождается внедрением в экономику цифровых технологий, позволяющих оперировать громадным количеством данных. Экономическая деятельность, базирующаяся на цифровых технологиях, получила название цифровой экономики. В ее основе лежит переход от товаров и услуг в материальном измерении к виртуальным операциям в оперативной памяти компьютеров, в которой производятся всевозможные операции с единицами измерения количества информации. Начиная с 2015 г., наблюдается экспоненциальный тренд накопления данных, информационная эра сменяется цифровой, появился облачный сервис, интернет вещей, искусственный интеллект. Для успешной реализации внедрения цифровой экономики необходимо во все большей степени использовать высокоскоростные цифровые телекоммуникации, связывающие центры хранения данных, производителей и потребителей услуг. Развитие цифровых технологий идет по пути повышения доступности, снижения массогабаритных показателей, быстродействия и функциональных возможностей, снижения и оптимизации энергопотребления. Поэтому требуется проектировать и создавать новое быстродействующее телекоммуникационное радиоэлектронное оборудование. Производство радиоэлектронного оборудования сопровождается решением проблемы создания элементной базы микро- и нанoeлектроники и повышения ее качественных характеристик. Для совершенствования элементной базы необходимо искать и синтезировать новые материалы и структуры, развивать и отрабатывать технологию их изготовления, изучать физические процессы и явления в наноструктурах, развивать физику наносистем. На основе понимания физических процессов разрабатываются конструкторско-технологические рекомендации для производства полупроводниковых элементов и интегральных схем.

Появление новых материалов и структур, уменьшение активных областей полупроводниковых приборов влечет за собой необходимость адаптации известных и разработки новых методов контроля их параметров и характеристик, уточнения физических моделей, лежащих в основе применяемых методов исследования. Функционирование приборов нанoeлектроники, активной областью которых являются полупроводниковые гетероструктуры, содержащие квантовые ямы (КЯ), квантовые точки (КТ), чередующиеся наноразмерные слои из аморфных и кристаллических полупроводников, основано на физических явлениях, связанных с размерным квантованием носителей заряда. Для изучения свойств таких структур требуется использование новейших разработок в области измерительного и диагностического оборудования, а также совершенствование известных экспериментальных методик и математического аппарата для обработки и интерпретации результатов измерений.

Степень разработанности темы. К важнейшим параметрам полупроводниковых материалов и приборов относятся электрофизические свойства, определяющие быстродействие и энергопотребление конечной радиоаппаратуры. Электрофизические свойства полупроводниковых структур характеризуются такими важнейшими параметрами, как профиль концентрации свободных носителей заряда (НЗ), энергетический спектр электронных состояний, определяемый конфигурацией активных областей, составом твердых растворов, профилем легирования донорной или акцепторной примесью, наличием дефектов структуры в объеме и на границах раздела активных слоев, образующих глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне полупроводника и т.д.

В настоящее время для изучения электрофизических свойств наноструктур применяются методы сканирующей туннельной микроскопии (СТМ), электрические разновидности атомно-силовой микроскопии (АСМ) – сканирующая микроскопия сопротивления растекания (СМСР), сканирующая емкостная микроскопия (СЕМ), сканирующая микроволновая микроскопия (СММ), микроскопия зонда Кельвина [1, 2]. СТМ применяется, например, для определения положения энергетических уровней в полупроводниковых квантовых точках. Методы СЕМ и СММ используются для изучения распределения концентрации легирующей примеси или основных носителей заряда вдоль плоской, покрытой тонким слоем диэлектрика, поверхности полупроводникового образца с разрешением вдоль плоскости до 10 нм [3-5]. Для определения профиля концентрации, удельного сопротивления при сканировании торцевой поверхности образца, на которую выходят границы раздела p-n-переходов, гетерограницы, используется СМСР [1].

Надежным неразрушающим методом измерения профиля концентрации в полупроводниковых барьерных структурах является метод вольт-фарадных характеристик [6, 7]. На положение энергетических уровней размерного квантования влияет качество гетерограниц, величины разрывов разрешенных энергетических зон на гетерогранице, параметры электрически активных дефектов, образующих глубокие и мелкие энергетические уровни. Для исследования глубоких уровней в полупроводниковых барьерных микро- и наноструктурах широко применяются электрические методы: спектроскопия адмиттанса, метод вольт-фарадных характеристик [7-9], релаксационная спектроскопия глубоких уровней (РСГУ) [7, 10, 11], спектроскопия низкочастотного (НЧ) шума [12]. Основные современные подходы к применению данных методов для диагностики полупроводниковых наноструктур, кроме указанных в ссылках на работы зарубежных авторов, можно найти в работах ведущих российских ученых – В.А. Мошникова, П.Н. Брункова, В.И. Зубкова, В.В. Андреева, И.Н. Мирошниковой, Г.П. Жигальского, А.В. Анкудинова, В.А. Быкова, В.В. Полякова и других.

Перечисленные методы исследования наноструктур рассчитаны на изучение образцов с макроскопическими электрическими контактами, для которых разработана и применяется модель плоского барьерного контакта, в которой толщина обедненного слоя много меньше минимального латерального размера контакта. Получаемые характеристики являются усредненными по площади барьерного или омического контакта, которая обычно составляет от $10^3 - 10^4$ мкм², что связано с чувствительностью входных трактов измерительных установок. Это значительно превышает характерные латеральные размеры квантовых точек, протяженность неоднородностей толщины и областей с различным составом полупроводниковых твердых растворов и т.д. Согласно международной дорожной карте развития технологии полупроводниковых приборов (International Technology Roadmap for Semiconductors) к 2021 году должен быть разработан и внедрен 3 нм технологический процесс изготовления интегральных схем. Это влечет за собой острую необходимость наличия методов исследования и контроля параметров и характеристик материалов и структур для электроники и интегральных схем настоящего и будущего поколений с пространственным разрешением от единиц до ста нанометров.

Особой актуальностью характеризуется разработка новых методов диагностики, обеспечивающих комплексное исследование материала или структуры, в результате которого будут получены данные о профиле концентрации, энергетическом спектре носителей заряда, параметрах зонной диаграммы, их распределений

локальных микро- и макронеоднородностей, в том числе и в нанометровом диапазоне. Для обеспечения комплексности и высокой локальности исследования электрофизических свойств полупроводниковых структур предлагается разработать новые методики. Они основаны на совместном использовании сканирующей зондовой микроскопии и методов вольт-фарадных характеристик, релаксационной спектроскопии глубоких уровней, спектроскопии НЧ шума. Комплексное применение разрабатываемых методов измерения локальных вольт-фарадных характеристик, локальной токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней и методик диагностики полупроводниковых материалов, микро- и наноструктур позволит получить взаимодополняющие данные и углубить представления о физических процессах в полупроводниках. Это будет способствовать развитию физики полупроводников, физического материаловедения, повысит уровень конструирования и моделирования полупроводниковых приборов для улучшения их технических и эксплуатационных характеристик.

Цель диссертационной работы – локальное исследование электрофизических свойств полупроводниковых микро- и наноструктур с помощью методов токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней, низкочастотной шумовой спектроскопии, атомно-силовой микроскопии для развития представлений о физических процессах в полупроводниковых структурах нанометровых размеров.

Основные задачи

1. Анализ существующих методов исследования энергетического спектра электронных состояний, профилей концентрации легирующей примеси, дефектов с глубокими энергетическими уровнями в полупроводниковых микро- и наноструктурах.

2. Развитие физической модели полупроводниковых наноструктур с точечным барьерным контактом, учитывающей конфигурацию барьерного контакта и исследуемой полупроводниковой микро- или наноструктуры в приближении сферической симметрии распределения электрического потенциала.

3. Разработка физической модели формирования тока релаксации при перезарядке энергетических уровней в полупроводниковой структуре на основе точечно-барьерного контакта, которая учитывает сферическую симметрию распределения электрического потенциала.

4. Развитие физических основ метода, основанного на совместном использовании токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней и атомно-силовой микроскопии и позволяющего осуществлять локальное исследование энергетического спектра электронных состояний в полупроводниковых микро- и наноструктурах в областях, размеры которых определяются размерами острия проводящего зонда атомно-силового микроскопа.

5. Уточнение модели формирования низкочастотного шума в полупроводниковых гетероструктурах с квантовой ямой.

6. Разработка методики локального измерения вольт-фарадной характеристики полупроводниковой структуры, основанной на использовании сканирующего зондового микроскопа, формировании точечного электрического контакта металл-полупроводник для получения трехмерного профиля распределения концентрации свободных носителей заряда.

7. Разработка измерительно-аналитических комплексов для реализации разработанных методик локального измерения вольт-фарадных характеристик, ло-

кальной токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней, спектроскопии НЧ-шума.

8. Исследование полупроводниковых наноструктур, структур с развитым рельефом поверхности для уточнения величин разрывов разрешенных энергетических зон в наноструктурах с квантовыми ямами различного состава и толщины, изучение распределения этих величин вдоль поверхности образцов, параллельной слою, образующему квантовую яму, при формировании точечного барьерного контакта с помощью разработанных методик исследования и применения уточненных физических моделей.

9. Обобщение полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований физических процессов в полупроводниковых микро- и наноструктурах.

Объекты исследования. Объектами исследования являлись гетероструктуры с квантовыми ямами (КЯ) на основе систем InGaAs/GaAs, ZnMgSSe/ZnSe, ZnCdS/ZnSSe и гетероструктуры с самоорганизующимися квантовыми точками (КТ) на основе системы CdSe/ZnSe, полупроводниковые микроструктуры с развитым рельефом поверхности на основе p-Si, гибридные гетероструктуры на основе наноразмерных слоев a-Si:H и кристаллического Si. Структуры на основе соединений A_3B_5 и A_2B_6 выращивались либо методом эпитаксии из молекулярных пучков (МПЭ), либо методом паровозной эпитаксии из металлоорганических соединений (ПФЭМОС).

Методы исследования. Для исследования электрофизических свойств полупроводниковых микро- и наноструктур использовались методы вольт-амперных характеристик при разных температурах, вольт-фарадных, адмиттансных характеристик при различных температурах и частотах тестового сигнала, токовой и емкостной релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ), спектроскопии низкочастотного шума. Для анализа структуры поверхности и реализации локальных исследований электрофизических характеристик использовалась атомно-силовая микроскопия. Для анализа структуры и топологии поверхности использовалась растровая электронная микроскопия с дополнительной опцией, позволяющей проводить элементный состав поверхности твердого тела методом рентгеновского энергодисперсионного микроанализа. Метод катодолюминесценции использовался для изучения спектров люминесценции в полупроводниковых квантово-размерных структурах.

Достоверность научных результатов работы обеспечивается:

- использованием общеизвестного математического аппарата физики полупроводников, физики наносистем;
- непротиворечивостью полученных результатов основным представлениям физики;
- использованием независимых взаимодополняющих методов исследования;
- соответствием полученных результатов исследования результатам работ других авторов, опубликованным в независимых источниках.

Эксперименты проводились в лабораториях Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина на поверенном и калиброванном измерительном оборудовании. Измерения спектров катодолюминесценции осуществлялись в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН. Тестовые образцы изготов-

ливались в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН, ООО «Солэкс-С», ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН.

Научная новизна представленных в работе результатов заключается в следующем:

1. Предложена новая математическая модель, описывающая переходный процесс релаксации тока при импульсном воздействии электрическим напряжением при перезарядке энергетических уровней размерного квантования в полупроводниковой точечно-барьерной структуре с квантовой ямой с контактом со сферической симметрией электрического потенциала с учетом заполнения уровней размерного квантования.

2. Разработан способ локального исследования энергетического спектра электронных состояний в полупроводниковых структурах, а именно в их областях, размеры которых находятся в нанометровом диапазоне (10 - 100 нм), определяемом диаметром точечного барьерного контакта, формируемого проводящим зондом атомно-силового микроскопа (АСМ), основанный на изучении температурной зависимости времени релаксации электрического тока через структуру при импульсном воздействии электрическим напряжением, отличающийся тем, что для формирования электрического контакта используется проводящий зонд АСМ, что обеспечивает локальность проведения измерений.

3. Разработана новая методика получения локальной вольт-фарадной характеристики полупроводниковой барьерной структуры в атто- и фемтофарадном диапазоне, заключающаяся в использовании зондовой системы атомно-силового микроскопа для осуществления электрического точечного контакта к поверхности полупроводникового образца, анализе постоянной составляющей тока через образец, содержащей составляющую, пропорциональную электрической емкости образца, при подаче на него пилообразного импульсного напряжения.

4. В результате комплексного исследования энергетического спектра носителей заряда методом токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней определены ранее неизвестные величины разрыва зоны проводимости, установлены закономерности в изменении энергетического спектра основного электронного состояния в квантовой яме в гетероструктурах $\text{ZnSSe}/\text{ZnMgSSe}$, $\text{ZnCdS}/\text{ZnSSe}$, выращенных методом паровозной эпитаксии из металл-органических соединений.

5. Изучены особенности потенциального рельефа для электронов в гетероструктуре CdSe/ZnSe с самоорганизованными квантовыми точками, полученными методом эпитаксии из молекулярных пучков, установлено наличие потенциального барьера для захвата электронов на основной энергетический уровень в квантовую точку CdSe при исследовании методом токовой РСГУ процесса перезарядки квантовых точек. Измерена усредненная величина энергии активации процесса эмиссии электронов из нескольких квантовых точек CdSe по температурной зависимости релаксации тока через структуру с помощью метода локальной токовой РСГУ, основанного на совместном, комплексном использовании токовой РСГУ и атомно-силовой микроскопии.

6. Впервые продемонстрировано, что с помощью разработанного метода локальной токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней можно изучать флуктуации величин разрывов разрешенных энергетических зон в гетероструктурах с квантовыми ямами. Измерена флуктуация величины разрыва зоны проводимости вдоль слоя $\text{Zn}_{0.4}\text{Cd}_{0.6}\text{S}$, образующего квантовую яму в гетероструктуре

$\text{Zn}_{0.4}\text{Cd}_{0.6}\text{S}/\text{ZnS}_{0.06}\text{Se}_{0.94}$, выращенной методом парофазной эпитаксии из металл-органических соединений.

7. Показано, что с помощью измерения и анализа температурной зависимости спектров низкочастотного шума можно изучать процессы перезарядки энергетических уровней в квантово-размерных слоях полупроводниковых гетероструктур. Впервые определена величина энергии активации процесса эмиссии носителей заряда с основного уровня размерного квантования и рассчитана величина разрыва зоны проводимости на интерфейсе квантовая яма - барьерный слой в гетероструктуре $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{GaAs}$ при изучении температурной зависимости спектра НЧ шума, генерируемого в локальной области с квантовой ямой в диоде Шоттки на основе гетероструктуры $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{GaAs}$.

8. Показана возможность получения локальных вольт-фарадных характеристик и расчета локального профиля распределения концентрации примеси в полупроводниковой структуре с точечным электрическим контактом проводящего зонда к поверхности полупроводникового образца при использовании атомно-силовой микроскопии. На примере Si полупроводниковой структуры с развитым рельефом поверхности в виде пирамид высотой и стороной основания 3 – 5 мкм получены вольт-фарадные характеристики с помощью формирования точечного электрического контакта к поверхности проводящим зондом атомно-силового микроскопа.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Математические соотношения для расчета зависимости от электрического напряжения барьерной емкости точечного контакта металл-полупроводник в приближении полусферической симметрии распределения электрического потенциала с учетом соотношения между диаметром металлического контакта и длины Дебая и нерезкой границы области пространственного заряда в объеме полупроводника. Математические соотношения позволяют анализировать вольт-фарадную характеристику точечного барьерного контакта для расчета профиля распределения концентрации примеси.

2. Математическое соотношение, описывающее переходной процесс релаксации электрического тока при перезарядке энергетических уровней в полупроводниковой структуре с квантовой ямой и точечным барьерным контактом в приближении полусферической симметрии распределения электрического потенциала и учетом заполнения квантовой ямы носителями заряда. Математическое соотношение может быть использовано при анализе спектров локальной токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней точечного барьерного контакта металла к полупроводниковой квантово-размерной структуре, для определения энергии активации, сечения захвата и концентрации глубоких центров.

3. Методика определения локальной концентрации свободных носителей заряда, заключающаяся в измерении токового отклика при подаче на полупроводниковую барьерную структуру периодического импульсного напряжения пилообразной формы амплитудой несколько тепловых потенциалов, расчете локальных вольт-фарадных характеристик, позволяющая получить латеральное распределение концентрации свободных носителей заряда с разрешением, определяемым размерами острия проводящего зонда, и пространственное распределение с дебаевским разрешением.

4. Комбинированный метод токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней и атомно-силовой микроскопии (локальной токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней), позволяющий локально измерять энергию акти-

вации процессов эмиссии и захвата носителей заряда на глубокие энергетические уровни, образуемые дефектами структуры или возникающие в наноразмерных слоях вследствие эффекта размерного квантования.

5. Значение энергии активации процесса эмиссии дырок из слоя квантовых точек InAs и зонная диаграмма наногетероструктуры с множественными квантовыми ямами и погруженными в них слоями квантовых точек (dots-under-the-well, DUWELL) на основе гетеросистемы InAs/In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs, предназначенной для изготовления лазера с рабочей длиной волны 1,3 мкм, полученное на основании исследования температурной зависимости спектров низкочастотных шумов, которое составило 487 ± 20 мэВ.

6. Величины разрыва зоны проводимости и флуктуации величины разрыва зоны проводимости вдоль эпитаксиального слоя, образующего квантовую яму в гетероструктуре Zn_{0.4}Cd_{0.6}S/ZnS_{0.06}Se_{0.94}, выращенной методом паровозной эпитаксии из металлоорганических соединений, определенные разработанным комбинированным методом токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней и атомно-силовой микроскопии.

7. Вид зонной диаграммы сложной гетероструктуры (НІТ-структуры) Ag/ITO/a-Si:H(p)/a-Si:H(i)/c-Si(n)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n+)/ITO/Ag, в которой энергетический зазор между уровнем Ферми и потолком валентной зоны в a-Si:H(p) составляет $0,36 \pm 0,02$ эВ, разница между уровнями Ферми на границе раздела a-Si:H(i)/c-Si(n) и зоной проводимости вблизи границы раздела со слоем c-Si(n) равна $0,72 \pm 0,02$ эВ при комнатной температуре, что экспериментально установлено с помощью комплексного применения методов токовой РСГУ, вольт-фарадных характеристик.

Практическая значимость работы

1. Развѣт метод вольт-фарадных характеристик за счет совмещения с техникой атомно-силовой микроскопии, углублены существующие представления о физических процессах, происходящих в полупроводниковых наногетероструктурах.

2. Разработан способ локального измерения вольт-фарадных характеристик и контроля профиля распределения концентрации свободных носителей заряда в полупроводниковой структуре, а именно в областях, размеры которых находятся в нанометровом диапазоне (менее 100 нм).

3. Разработана комплексная методика измерения температурной зависимости спектров низкочастотного шума, вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик локальных областей полупроводниковых микроструктур и наноструктур с квантовыми ямами и/или слоями квантовых точек и позволяющая определять энергетический спектр электронных состояний.

4. Разработана методика локальной токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней, позволяющая исследовать энергетический спектр электронных состояний в локальных областях полупроводниковых микро- и наноструктур, размеры которых соизмеримы с диаметром острия проводящего зонда атомно-силового микроскопа, используемого для поиска, визуализации исследуемой наноразмерной области поверхности образца и осуществления точечного электрического контакта для проведения измерений.

5. 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, реализовать метод токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней в температурном диапазоне 7 - 500 К.

6. Получены локальные профили распределения концентрации носителей заряда в кремниевых структурах, используемых при производстве фотоэлектрических преобразователей для солнечной энергетики, с развитым рельефом поверхности в виде пирамид высотой и стороной основания 3 - 5 мкм.

7. 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/ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ /GaAs, предназначенной для изготовления лазера с рабочей длиной волны 1,3 мкм, что позволило уточнить параметры зонной диаграммы наногетероструктуры.

Внедрение результатов. Научные исследования выполнены при поддержке грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых ученых – МК-2616.2008.2. Полученные экспериментальные результаты использованы при подготовке отчетов о научно-исследовательской работе НИР 35-12Г. Полученные научные результаты использовались при разработке методики комплексной диагностики полупроводниковых материалов микро- и наноструктур для солнечной энергетики (НИР 17-14Г), а также в учебном процессе подготовки бакалавров по направлению 11.03.04 и магистров по направлению 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника». Разработанные методики внедрены и используются в исследовательских лабораториях Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования при ФГБОУ ВО «РГРТУ».

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на профильных международных, всероссийских конференциях, симпозиумах, школах-семинарах, в том числе на международных конференциях «II-VI compounds» (Бремен, Германия, 2001 г., Варшава, Польша, 2005 г., Чеджу, Корея, 2007 г., Санкт-Петербург, 2009 г., Канкун, Мексика, 2011 г.), 7-й международный семинар “Beam Injection Assessment of Microstructures in Semiconductors” (Лилль, Франция, 2003 г.), VII, VIII, IX, X международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники» (г. Санкт-Петербург, 2010, 2012, 2014, 2016), Международной конференции по промышленной технологии ICIT-2015 (Севилья, Испания, 2015г.), 32-й международной европейской конференции по фотовольтаике EUPVSEC-2016 (Мюнхен, Германия, 2016), 24-25-й международной конференции по шумам и флуктуациям ICNF (Вильнюс, Литва, 2017 г., Невшател, Швейцария, 2019 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 107 работ. Из них: 1 монография, 39 статей (из них 29 статей из перечня, рекомендованного ВАК РФ, 20 статей (в англоязычных и переводных отечественных журналах) входят в базы данных Web of Science и Scopus), 52 тезиса докладов, 3 патента на изобретение, 12 свидетельств о государственной регистрации программы ЭВМ.

Личный вклад автора. Автором диссертации во всех работах, выполненных в соавторстве, осуществлена постановка задач исследований, разработаны основные методы проведения исследований, внесен основной вклад в получение, анализ и обобщение теоретических и экспериментальных результатов. Автором разработаны структурные, функциональные и электрические принципиальные схемы отдельных узлов макетов установок для реализации локального измерения вольт-фарадных характеристик, измерения спектров токовой релаксационной спек-

троскопии глубоких уровней. Анализ экспериментальных результатов и разработка теоретических моделей выполнены автором самостоятельно, а также совместно с с.н.с., к.ф.-м.н. А.В. Ермачихиным (РГРТУ), к.ф.-м.н. Д.С. Кусакиным (РГРТУ). Планирование экспериментов по измерению электрофизических параметров и характеристик образцов осуществлялось автором самостоятельно. Выполнение экспериментов с использованием методов атомно-силовой микроскопии, спектроскопии адмиттанса, вольт-амперных, вольт-фарадных характеристик, токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней, спектроскопии низкочастотного шума, растровой электронной микроскопии, рентгеновского энергодисперсионного микроанализа проводились совместно с с.н.с., к.ф.-м.н. Н.Б. Рыбиным (РГРТУ), с.н.с., к.ф.-м.н. А.В. Ермачихиным (РГРТУ), к.ф.-м.н. Д.С. Кусакиным (РГРТУ). Обсуждение полученных результатов проводилось совместно с г.н.с., д.ф.-м.н., проф. С.П. Вихровым (РГРТУ), в.н.с., к.т.н., Н.В. Вишняковым (РГРТУ). Спектры катодолуминесценции были измерены д.ф.-м.н. В.И. Козловским (ФИАН им. П.Н. Лебедева, РАН, г. Москва). Образцы полупроводниковых гетероструктур A_2B_6 , A_3B_5 предоставлены д.ф.-м.н. В.И. Козловским (ФИАН им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва), д.ф.-м.н., проф. Ю.Г. Садофьевым (ФИАН им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва), образцы кремниевых микроструктур предоставлены ведущим специалистом ООО «СОЛЭКС-С» В.Н. Щелушкиным, образцы НИТ-структуры предоставлены д.т.н., проф. Е.И. Теруковым (НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 183 наименований, приложения. Диссертация изложена на 332 страницах машинописного текста, содержит 28 таблиц и 128 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, выносимые на защиту научные положения, сформулированы научная новизна, практическая значимость полученных результатов.

В первой главе представлен литературный обзор основных зондовых методов, позволяющих осуществлять локальные измерения электрических характеристик (концентрации свободных НЗ, удельного сопротивления, электрического потенциала) полупроводниковых микро- и наноструктур. С уменьшением размеров активных областей элементов возрастает влияние на физику их работы микро- и макронеоднородностей распределения электрических характеристик, различных дефектов структуры, особенностей рельефа поверхности и границ раздела. Чтобы выявить эти макронеоднородности, используются зондовые методы, имеющие свои ограничения. Рассмотрены физические основы сканирующей микроволновой микроскопии, сканирующей микроскопии сопротивления растекания (СМСР). Обсуждаются основные возможности и ограничения данных методов исследования. С использованием результатов анализа эквивалентных схем методов контактной сканирующей емкостной микроскопии (КСЕМ) и СМСР предлагается электрическая эквивалентная схема точечного барьерного контакта металл – полупроводник.

На основе обзора электрических зондовых методов для измерения концентрации свободных носителей заряда в полупроводниковых материалах проведено обоснование выбора методики для локального измерения профиля концентрации свободных носителей заряда в полупроводниковых структурах. Для применения данной методики проанализированы электрофизические свойства точечного барьер-

ерного контакта металл-полупроводник. Точечный барьерный контакт анализируется в приближении сферической симметрии распределения электрического поля и потенциала в полупроводнике и резкой границы области пространственного заряда (ОПЗ) в полупроводнике. Однако, когда размеры контакта становятся соизмеримы с длиной Дебая, необходимо учитывать размытие границы ОПЗ. Описывается решение уравнения Пуассона в сферических координатах точечного контакта металл – полупроводник n-типа в приближении отсутствия заряда на поверхностных состояниях:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\phi}{dr} \right) = - \frac{eN(1 - e^{-e\phi/k_B T})}{\epsilon \epsilon_0}, \quad (1)$$

где e – элементарный заряд, T – абсолютная температура, ϵ_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость, ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника, N – концентрация ионизированной мелкой донорной примеси (можно рассматривать аналогичным образом акцепторную примесь), ϕ – электрический потенциал, k_B – постоянная Больцмана, r – расстояние от геометрического центра контакта металлического зонда к поверхности полупроводника до точки в объеме полупроводника. В данном случае не учитывался заряд на поверхностных состояниях. Зависимость электрического потенциала в полупроводнике в результате решения уравнения (1) описывается выражением:

$$\phi(r, r_0) = - \frac{r_0}{r} (U_K + U_R) \exp \left(\frac{r_0 - r}{L_D} \right), \quad (2)$$

где r_0 – радиус закругления точечного контакта, L_D – длина Дебая, U_K – диффузионный потенциал, U_R – величина напряжения смещения.

Значение электрической барьерной емкости точечного контакта можно вычислить как производную заряда ионизированных примесей Q в ОПЗ по напряжению:

$$C(U) = \frac{dQ}{dU}.$$

Контакт к поверхности исследуемой структуры осуществляется проводящим зондом АСМ. В расчетах пренебрегали зарядом поверхностных состояний, кроме этого, выполняется условие, что положение внутренней границы ОПЗ в полупроводнике $R > r_0$, то контакт можно считать в первом приближении полусферическим.

Далее величина барьерной емкости для полусферического контакта находится по формуле:

$$C(U) = 2\pi e N R^2(U) \left[\frac{dR(U)}{dU} \right], \quad (3)$$

где R – координата положения края ОПЗ в полупроводнике в точечно-барьерном контакте со сферической симметрией распределения электрического потенциала.

На рис. 1 представлены расчетные зависимости удельной емкости точечного и плоского барьерного контакта (рис. 1, а) и отношения удельной емкости точечного к удельной емкости плоского барьерного контакта (рис. 1, б) от обратного напряжения с учетом размытия внутренней границы ОПЗ в точечном барьерном контакте при концентрации мелких доноров 10^{15} см^{-3} и радиусе точечного контакта

50 нм (материал p-Si).

Из результатов теоретических расчетов C-V характеристик следует, что меняется характер C-V зависимости из-за изменения характера изменения электрического потенциала в ОПЗ полупроводника. Выбор модели контакта будет влиять на точность расчета профиля концентрации свободных НЗ. Электрическая емкость точечного барьерного контакта металл – полупроводник зависит как от концентрации носителей заряда, так и от радиуса контакта (радиуса используемого проводящего зонда). В приближении полусферического контакта при росте обратного напряжения емкость будет слабо увеличиваться в отличие от плоского барьерного контакта. Это объясняется тем, что в плоском барьерном контакте его площадь не зависит от обратного напряжения, а в полусферической модели площадь поверхности, соответствующая внутренней границе ОПЗ в полупроводнике, увеличивается с ростом обратного напряжения. Также из расчетов и рис. 1 следует, что удельная емкость сферического контакта примерно в 3,7 – 5,7 раз больше удельной емкости плоского контакта, и это соотношение увеличивается с ростом обратного напряжения смещения.

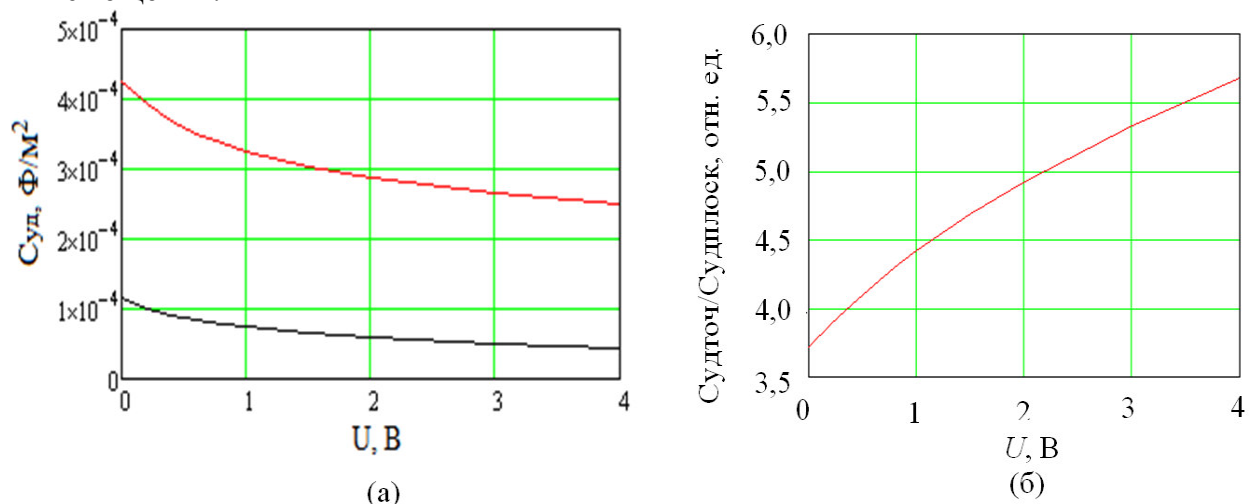


Рис. 1.: а – Зависимость удельной емкости плоского (нижняя кривая) и точечного (верхняя кривая) барьерного контакта от обратного напряжения; б – зависимость отношения удельных емкостей точечного и плоского барьерных контактов от обратного напряжения

Из теоретического анализа распределения потенциала в ОПЗ (рис. 2 - 4, абсцисса полый точки на рисунках равна длине Дебая) следует, что при увеличении концентрации свободных НЗ ширина ОПЗ в полупроводнике в плоском барьерном контакте металл – полупроводник становится соизмеримой с размером ОПЗ в полупроводнике для случая контакта со сферической симметрией распределения электрического поля.

В диапазоне концентраций СНЗ $10^{15} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и радиусов контакта $r_0 = 50 - 100 \text{ нм}$ длина Дебая (рассчитанная для Si) практически всегда меньше радиуса полусферической ОПЗ, оказывается соизмерима или меньше радиуса острия зонда, кроме случая $r_0 = 10 \text{ нм}$. При радиусе металлического контакта более 10 нм в диапазоне концентраций СНЗ $10^{15} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$ зависимость электрического потенциала от координаты в полупроводнике будет, по всей видимости, близка к зависимости, наблюдаемой в плоском контакте Шоттки, сферической симметрией можно пренебречь. С другой стороны, при использовании зондов с радиусом закругления острия менее 10 нм и уровнях легирования более 10^{17} см^{-3} целесообразно для расчета профиля концентрации по измеренной C-V характеристике использо-

вать модель точечного барьерного контакта со сферической симметрией распределения электрического поля.

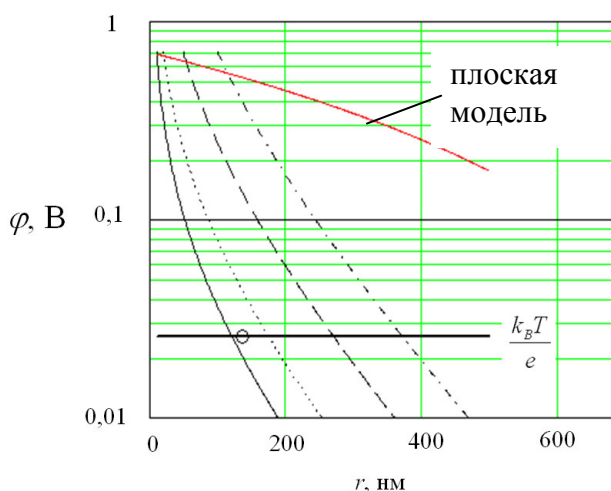


Рис. 2. Теоретическое распределение модуля электрического потенциала в полупроводнике; концентрация СНЗ в полупроводнике равна 10^{15} см^{-3} , напряжение $U_R = 0$, $U_k = 0,7 \text{ В}$; радиус контакта: 10 нм (сплошная кривая линия), 20 нм (пунктирная линия), 50 нм (штриховая линия), 100 нм (штрихпунктирная линия)

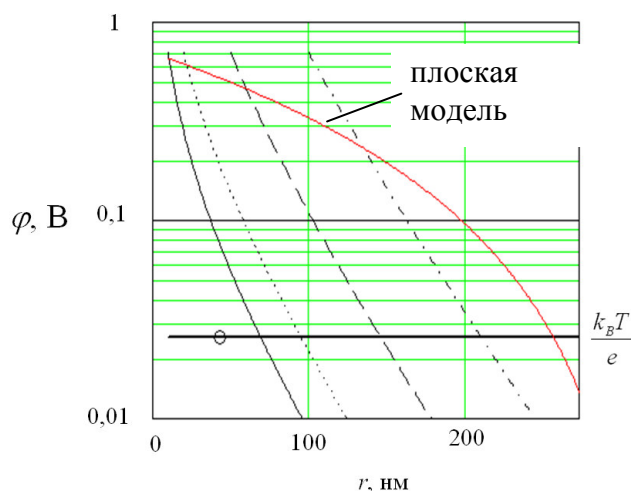


Рис. 3. Теоретическое распределение модуля электрического потенциала в полупроводнике; концентрация СНЗ в полупроводнике равна 10^{16} см^{-3} , напряжении $U_R = 0$, $U_k = 0,7 \text{ В}$; радиус контакта: 10 нм (сплошная кривая линия), 20 нм (пунктирная линия), 50 нм (штриховая линия), 100 нм (штрихпунктирная линия)

На основе анализа модели точечного барьерного контакта металл – полупроводник разработана методика локального измерения электрической емкости с использованием техники АСМ. Проводящий зонд АСМ и поверхность образца образуют паразитную емкость C_p , которая суммируется с электрической емкостью точечного барьерного контакта металл – полупроводник C , которую необходимо измерить:

$$C_{\Sigma} = C_p + C.$$

Емкость контакта является функцией приложенного напряжения. На контакт подаются постоянное напряжение U и напряжение измерительного сигнала $u(t)$ с малой амплитудой в несколько $k_B T / e$. Поэтому измерительный сигнал не приводит к изменению барьерной емкости структуры и $C(U + u(t)) = C(U)$.

Изменение постоянного напряжения U приводит к смещению края области пространственного заряда (ОПЗ) в полупроводнике, что позволяет осуществить так называемое профилирование, а малое пило-

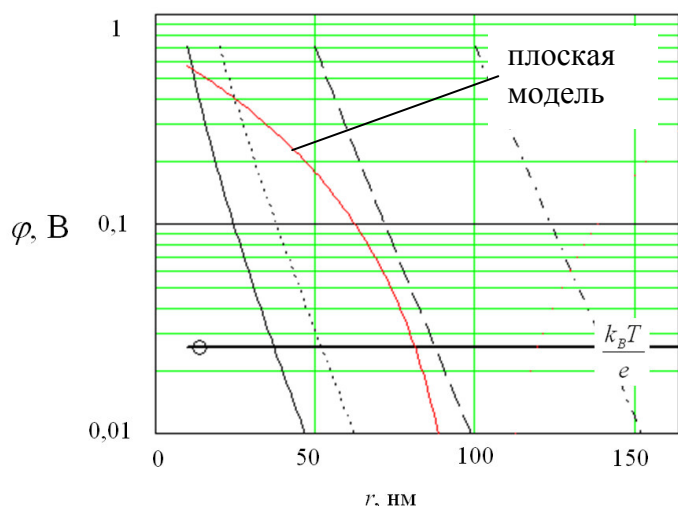


Рис. 4. Теоретическое распределение модуля электрического потенциала в полупроводнике; концентрация СНЗ в полупроводнике равна 10^{17} см^{-3} , напряжении $U_R = 0$, $U_k = 0,7 \text{ В}$; радиус контакта: 10 нм (сплошная кривая линия), 20 нм (пунктирная линия), 50 нм (штриховая линия), 100 нм (штрихпунктирная линия)

образное напряжение используется для измерения емкости C_{Σ} .

Заряд электрической емкости будет равен $Q = C_{\Sigma} \cdot (U + u(t))$, поэтому мгновенное значение тока через суммарную емкость определяется из выражения:

$$i(t) = (C_p + C(U)) \frac{du}{dt}. \quad (4)$$

Для пилообразного напряжения величина $du/dt = \alpha$ является постоянной. Ток имеет начальный экспоненциальный участок, обусловленный перезарядкой барьерной емкости, и участок, на котором присутствуют только постоянная составляющая с шумами, пропорциональная величине $C_p + C(U)$, и составляющая, обусловленная током утечки. Ток утечки измеряется в начале эксперимента, путем измерения статической вольт-амперной характеристики.

В интервале времени, в котором барьерная емкость достигает установившегося значения и не зависит от времени в цепи такой емкости, появится постоянная составляющая тока $i_{c-} = \alpha C(t)$:

$$i_{c-}(U) = 2\pi e \alpha N(R) R^2(U) \left[\frac{dR(U)}{dU} \right], \quad (5)$$

где $N(R)$ – концентрация носителей заряда в точечно-барьерном контакте.

Выражение (5) позволяет построить C-V характеристику, рассчитать профиль концентрации для случая полусферической симметрии распределения электрического поля в полупроводнике. При этом необходимо контролировать, получен ли контакт выпрямляющим или омическим, какой модели контакта соответствует характер C-V зависимости. В случае, если толщина полупроводникового слоя менее длины Дебая, то слой будет полностью обеднен носителями заряда и емкость контакта практически не будет зависеть от напряжения. Такой случай реализуется, когда исследуется тонкий обедненный НЗ полупроводниковый слой толщиной менее длины Дебая, нелегированный или компенсированный высокоомный полупроводниковый материал.

Во второй главе обсуждаются физические основы спектроскопии низкочастотного шума, токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней (ТРСГУ) и особенности их применения для исследования полупроводниковых квантово-размерных гетероструктур, созданные аппаратно-программные комплексы для реализации данных методик.

При рассмотрении диода Шоттки с базой n-типа и ГУ E_t в базе (рис. 5) генерация НЧ шума в такой структуре будет происходить вследствие флуктуации концентрации электронов в зоне проводимости за счет перезарядки ГУ E_t в той области образца, где E_t пересекается с уровнем Ферми в точке с координатой x_0 (показано стрелками на рис. 5). Изменяя напряжение на диоде, можно сдвигать

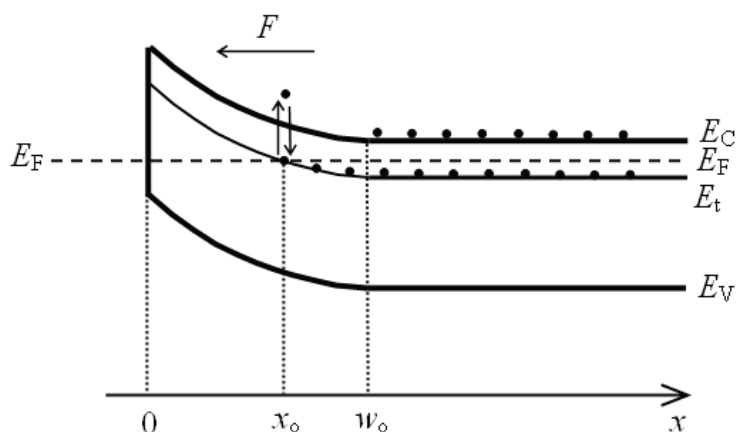


Рис. 5. Фрагмент зонной диаграммы диода Шоттки с базой n-типа и ГУ E_t

Изменяя напряжение на диоде, можно сдвигать

точку пересечения E_t и E_F , и тем самым по изменениям на спектрах плотности мощности НЧ шума уточнять его природу или причину возникновения.

Согласно известной модели генерационно-рекомбинационного шума спектральная плотность мощности (СПМ) НЧ шума $S(\omega)$ как стационарного случайного процесса описывается суперпозицией ряда составляющих лоренцевой функции:

$$S(\omega) = C \int_0^w \frac{\tau}{1 + \omega^2 \tau^2} dx, \quad (6)$$

где интегрирование проводится по координате x в пределах толщины ОПЗ (от 0 до w), в которой происходит перезарядка электронных уровней; ω – круговая частота; C – коэффициент пропорциональности; τ – время релаксации активационного процесса. На зависимости СПМ наблюдается характерный излом на частоте f_b . При этом излому СПМ соответствует выражение:

$$\omega\tau = 1, \quad \omega = 2\pi f_b, \quad \tau = \frac{1}{e_n}, \quad (7)$$

где e_n – средняя скорость эмиссии НЗ, которая определяется из равновесной статистики Шокли-Рида-Холла, $e_n = 2\pi f_b$.

Для дискретного ГУ известно выражение для скорости эмиссии:

$$e_n = AT^2 \exp(-E_a / k_B T), \quad (8)$$

где A – не зависящий от температуры коэффициент, E_a – энергия активации, T – температура.

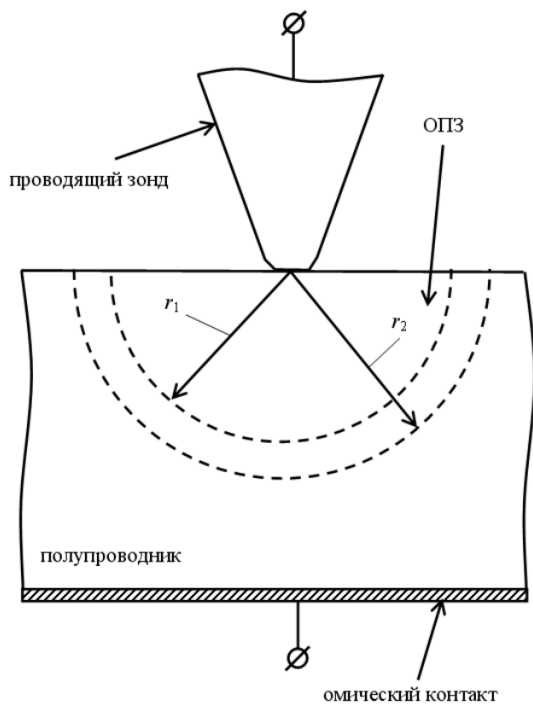


Рис. 6. Схематичное изображение точечного барьерного контакта металл – полупроводник. Штриховой линией показана внутренняя граница ОПЗ в полупроводнике: r_1 – радиус ОПЗ при напряжении U_{R1} , r_2 – радиус ОПЗ при напряжении U_{R2} ; $|U_{R2}| > |U_{R1}|$

В случае исследования энергетических уровней в КЯ выражение (8) не учитывает заполнения минизон (часто говорят уровней) размерного квантования НЗ. Пусть есть диод Шоттки с базой n -типа и квантовой ямой для электронов в зоне проводимости. В условиях термодинамического равновесия для процессов захвата и эмиссии электронов из КЯ с основного уровня размерного квантования скорость эмиссии электронов определяется как [9]:

$$e_n = \frac{2\langle v_T \rangle}{f \lambda_T} \exp\left(-\frac{\Delta E_C - E_{e1}}{k_B T}\right), \quad (9)$$

где $\langle v_T \rangle = (8k_B T / \pi m_w^*)^{1/2}$ – средняя тепловая скорость электронов в барьерных слоях; $\lambda_T = (2\pi \hbar^2 / m_w^* k_B T)^{1/2}$ – термическая длина; m_n^* – эффективная масса электрона в барьерном слое; m_w^* – эффективная масса электрона в КЯ; ΔE_C – величина разрыва зоны проводимости; E_{e1} – энергия основного уровня размерного квантования

электронов в КЯ; f – фактор заполнения КЯ электронами с учетом вырождения

двумерного газа носителей заряда в КЯ. Использование выражения (9) несколько меняет методику определения энергии активации по сравнению с выражением (8), поскольку в предэкспоненциальном множителе присутствует температура в первой степени. Выражение (9) дополнительно позволяет исследовать заполнение уровней размерного квантования НЗ. Для определения энергии активации глубокого центра строится прямая Аррениуса в координатах $\ln(e_n/T^2) - 1/T$, а в случае КЯ – в координатах $\ln(e_n/T) - 1/T$.

Изучение температурной и полевой зависимости спектров шума позволяет исследовать энергетический спектр электронных состояний в полупроводниковых микро- и наноструктурах.

В данной главе также рассмотрены физические основы токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней (ТРСГУ) и особенности ее применения для изучения процессов эмиссии и захвата носителей заряда на уровни размерного квантования в квантовых ямах. Токовый вариант РСГУ был выбран как наиболее чувствительный по концентрации и менее требовательный к величине сопротивления базы.

Для точечного барьерного контакта металл – полупроводник уточнены выражения для тока релаксации. Рассмотрим полупроводник n-типа проводимости при разных обратных напряжениях смещения в приближении сферической симметрии распределения электрического поля (рис. 6). На рис. 6 радиусы r_1 и r_2 соответствуют положению края ОПЗ при разных напряжениях на структуре.

В случае точечного барьерного контакта выражение для тока релаксации записывается как разность токов генерации и смещения, получается соотношение:

$$i(t) = \frac{2\pi e N_t}{\tau_n} \left[\frac{(r_2 - \lambda)^3 - (r_1 - \lambda)^3}{3} - \frac{(r_2 - \lambda)^4 - (r_1 - \lambda)^4}{4r_2} \right] \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right), \quad (10)$$

где λ – расстояние от внутренней границы ОПЗ в полупроводнике до точки пересечения квазиуровня Ферми и глубокого уровня E_t .

Предэкспоненциальный множитель пропорционален эффективному объему полупроводника, в котором происходит перезарядка глубокого уровня с временем релаксации τ . Выражение (10) целесообразно использовать для вычисления концентрации глубоких центров (ГЦ) в случае, если при предварительном анализе C-V характеристики структуры выяснится, что C-V зависимость характерна для точечно-барьерного контакта. Если реализуются такие условия измерения, что $r_2 \gg r_1$ и $r_2 \gg \lambda$, выражение (10) примет вид:

$$i(t) = \frac{\pi e N_t r_2^3}{6\tau_n} \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right). \quad (11)$$

Для реализации комплексных исследований создан аппаратно-программный комплекс, позволяющий использовать дополняющие друг друга методы температурной зависимости вольт-амперных, вольт-фарадных характеристик, спектроскопии адмиттанса, релаксационной спектроскопии глубоких уровней.

Для проведения локального измерения вольт-фарадных, вольт-амперных характеристик и спектров глубоких уровней полупроводниковых материалов и структур также был разработан макет измерительной установки (Патенты на изобретение № 2415389, № 2493631). Применение разработанного макета измерительной установки обеспечивает комплексность исследований полупроводниковых структур в микро- и нанометровом диапазоне. В табл. 1 приведены параметры ма-

кета для реализации измерений локальных I-V, C-V, ТРСГУ характеристик с использованием проводящего зонда АСМ.

Таблица 1

Параметры измерительной установки для исследования локальных I-V, C-V характеристик и локальной ТРСГУ с использованием АСМ с проводящими зондами

Параметр	Значение
Режим измерения: I-V, C-V	
Диапазон измеряемой емкости (косвенное измерение)	100 аФ...100 пФ
Диапазон измеряемого тока (постоянной составляющей)	1 пА...10 мкА
Диапазон амплитуд напряжения	–5... +5 В
Диапазон dU/dt (определяется параметрами используемого функционального генератора)	0,1...10 ⁵ В/с
Температура образца	– 40°С ÷ 100 °С
Режим измерения: локальная ТРСГУ	
Коэффициент преобразования	10 ³ – 2·10 ⁷ Ом
Длительность переходного процесса релаксации тока	10 мкс – 1 с
Чувствительность по концентрации глубоких центров N_t	10 ^{–7} N _D – N _A
Минимальный ток релаксации	2 пА

В третьей главе представлены результаты комплексного экспериментального исследования перспективных для создания излучательных элементов синей, сине-зеленой области спектра гетероструктур на основе CdSe/ZnSe с квантовыми точками ZnCdS/ZnSSe, ZnSe/ZnMgSSe с квантовыми ямами, которые позволили определить величины разрывов разрешенных энергетических зон. Исследования проводились с помощью разработанных методик и аппаратно-программных комплексов.

Структуры с квантовыми точками CdSe/ZnSe были выращены на p⁺-GaAs подложке с кристаллографическим направлением (100) методом эпитаксии из молекулярных пучков и содержали слой CdSe в барьерных слоях ZnSe толщиной 200 нм или 50 нм. Структуры детально изучены методами КЛ, ТРСГУ, локальной ТРСГУ с преобразованием Лапласа. По спектрам КЛ определялись энергии излучательных переходов. Спектры ТРСГУ измерялись дополнительно для контрольного образца, содержащего буферный слой ZnSe без слоев квантовых точек. На ТРСГУ спектрах образцов с КТ появлялись дополнительные пики $E1$ и $E1^*$, энергия активации которых коррелировала с энергиями излучательных переходов в КТ.

Для уточнения потенциального рельефа для электронов вблизи КТ и оценки высоты потенциального барьера для захвата электронов в КТ исследовалась зависимость амплитуд $E1$ и $E1^*$ при различных временах релаксации от длительности заполняющего импульса (рис. 7). Это позволило определить температурную зависимость поперечного сечения захвата $\sigma(T)$ как: $\sigma(T) = \sigma_{\infty} \exp(-E_{\sigma}/kT)$, где σ_{∞} – постоянный коэффициент, не зависящий от температуры и имеющий физический смысл сечения захвата при бесконечно большой температуре, E_{σ} – высота потенциального барьера для захвата, k – постоянная Больцмана. Результаты аппроксимации: $\sigma_{\infty} = 3,2 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2$, $E_{\sigma} = 24 \text{ мэВ}$ и $\sigma_{\infty} = 1,8 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2$, $E_{\sigma} = 150 \text{ мэВ}$ для $E1$ и $E1^*$ соответственно.

Данная структура была исследована с применением разработанной методики локальной ТРСГУ. Исследования проводились при различных температурах. Перед изменением температуры зонд отводился от образца. Для учета термодрейфа зонда АСМ на поверхности образца методом силовой литографии был нанесен рисунок, что позволяет легко обнаружить место контакта зонда после изменения температуры образца. Точка формирования контакта выбиралась таким образом, чтобы получался устойчивый сигнал релаксации тока (верхняя часть рис. 8). Размеры изучаемой области поверхности образца не превышали 70 нм, что определялось диаметром острия зонда АСМ. Поверхностная плотность КТ, оцененная по АСМ изображениям и косвенно по величинам слоевой концентрации электронов из ТРСГУ измерений, составила 10^{11} см^{-2} . На рис. 9 представлена топология поверхности образца 284, полученная при сканировании с помощью атомно-силового микроскопа. Сканирование проводилось перед исследованием локальной ТРСГУ с преобразованием Лапласа. Белой точкой на рис. 9 указано место контакта зонда.

По температурным зависимостям скоростей эмиссии были рассчитаны энергии активации процессов эмиссии, которые составляли 220 и 620 ± 20 мэВ. Пик со значением энергии 620 мэВ совпал по энергии с пиком $E1^*$, полученным ранее из ТРСГУ-исследований.

Гетероструктуры $\text{ZnCdS}/\text{ZnSSe}$ с одиночной квантовой ямой, выращенные методом парофазной эпитаксии из металл-органических соединений (ПФЭМОС) на подложках n^+ -GaAs, также были исследованы комплексом методов для определения параметров зонной диаграммы и изучения неоднородности распределения величины разрыва зоны проводимости вдоль поверхности эпислоев. КЯ $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{S}$ имели толщину 5 нм, $x = 0,4$, буферный слой $\text{ZnS}_y\text{Se}_{1-y}$ имел толщину 600 нм, $y = 0,06$, толщина покровных слоев $\text{ZnS}_y\text{Se}_{1-y}$ составляла 100, 150 и 200 нм.

Был также выращен тестовый образец без КЯ с буферным слоем $\text{ZnS}_{0.06}\text{Se}_{0.94}$. В результате измерений этого образца на спектре ТРСГУ обнаружен только один пик E_4 с $E_t = 346$ мэВ. Сравнение спектров ТРСГУ образцов с КЯ и без КЯ позволило сделать вывод, что появление КЯ в структуре приводит к появлению дополнительных пиков на ТРСГУ-спектре. Эти пики обусловлены возникновением в слое КЯ, на гетерограницах и в покровном слое ГЦ – структурных дефектов из-за частичной релаксации упругих напряжений, появлением гетерограниц, на которых

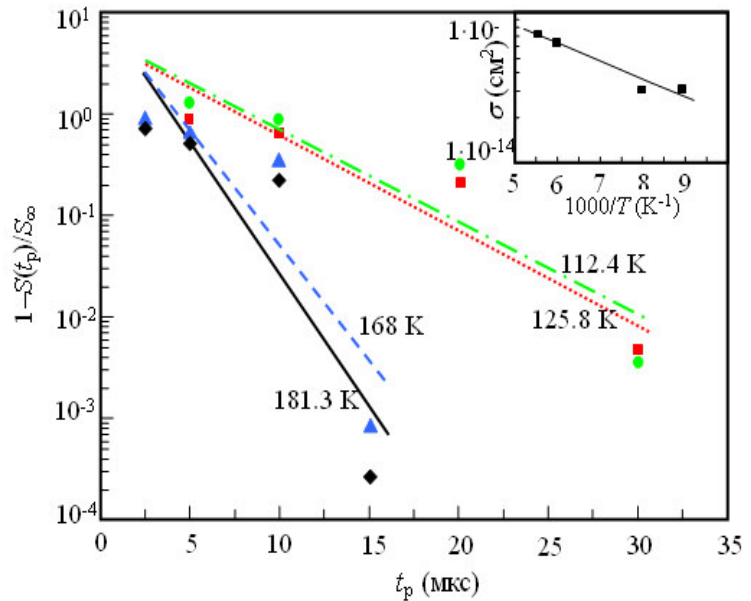


Рис. 7. Зависимость нормализованной амплитуды ТРСГУ-пика от длительности импульса заполнения при различных температурах. На вставке представлена температурная зависимость сечения захвата σ для образца #281

нарушается стехиометрическое соотношение анионов и катионов. Энергия низкотемпературного пика коррелирует с энергией излучательного перехода в КЯ.

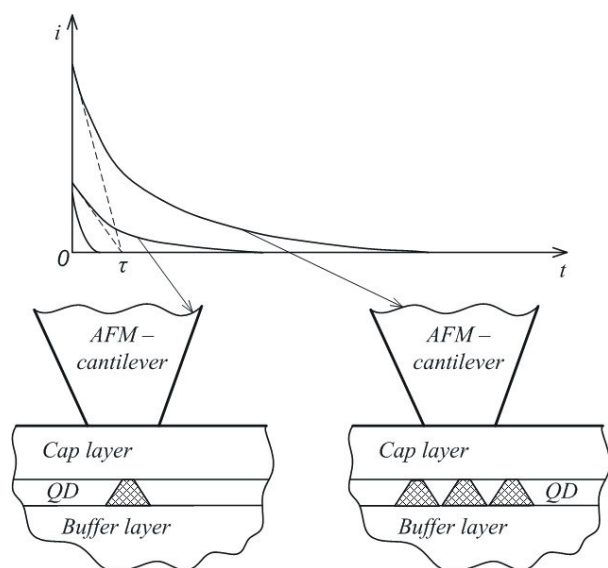


Рис. 8. Зависимость тока релаксации от времени при различных случаях неравномерного распределения КТ. τ – время релаксации переходного процесса установления обратного тока через структуру, зависящая от температуры и энергии активации процесса эмиссии НЗ из КТ

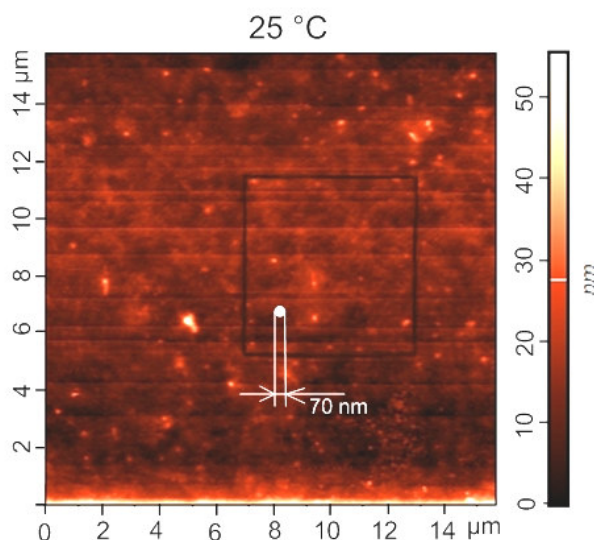


Рис. 9. АСМ-изображение поверхности образца

Методом локальной ТРСГУ с преобразованиями Лапласа измерялась энергия активации процесса эмиссии электронов с основного уровня размерного квантования в КЯ для определения величины разрыва зоны проводимости ΔE_c и исследования ее макро- или микронеоднородного распределения вдоль поверхности наноструктуры с одиночной квантовой ямой. Образец размещался в измерительной ячейке АСМ так же, как и образец CdSe/ZnSe с КТ. Методом локальной ТРСГУ была обнаружена разница между процессами эмиссии электронов из КЯ в различных точках поверхности образца с КЯ. Вначале сканировалась поверхность покровного слоя, после этого к одной из точек поверхности подводился проводящий зонд АСМ с покрытым золотом острием и формировался барьерный контакт. Острие зонда имело диаметр около 100 нм. Размер острия зонда и состояние проводящего покрытия контролировалось до и после эксперимента с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6610LV с приставкой для проведения рентгеновского энергодисперсионного микроанализа Oxford Instruments Inca X-Max20.

Величина разрыва зоны проводимости, полученная по данным ТРСГУ-метода, определяется следующим образом: $\Delta E_c = E_t + \Delta E_{F-P} + E_{el}$, где E_t – энергия активации, определяемая из ТРСГУ-спектров, ΔE_{F-P} – величина понижения потенциального барьера за счет эффекта Пула – Френкеля, E_{el} – энергия основного уровня размерного квантования электронов. Для центральной области поверхности образца размером $20 \times 20 \text{ мкм}^2$ разрыв зоны проводимости составил $\Delta E_c = 392 \pm 20 \text{ мэВ}$.

Значения величины разрыва зоны проводимости для образца № 458, полученные методом ТРСГУ с преобразованием Лапласа (ЛТРСГУ) совместно с АСМ на краю и в центре образца, а также методом ТРСГУ, представлены в табл. 2.

Рассмотрены результаты комплексного исследования электрофизических свойств и катодоллюминесценции высокоомных структур ZnSe/ZnMgSSe с квантовыми ямами. В данной гетеропаре барьерные слои выполнены на основе четырехкомпонентного твердого раствора ZnMgSSe, состав которого был согласован по периоду кристаллической решетки к подложке (001) GaAs. Гетероструктура перспективна для получения синего излучения для дисплейных приложений. Данные по измерению спектров КЛ и ТРСГУ были использованы для определения параметра разрыва зоны проводимости $Q_C = (E_a + E_{e1} - E_\sigma) / (\Delta E_{CL} + E_{e1} + E_{hh1})$, где E_a – энергия активации для эмиссии электронов с основного уровня размерного квантования в КЯ; E_σ – высота потенциального барьера для захвата электронов; E_{e1} и E_{hh1} – энергия основного уровня размерного квантования электронов и тяжелых дырок соответственно; ΔE_{CL} – энергетический сдвиг между линиями излучения КЯ и барьерного слоя на спектре КЛ. Величина Q_C для различных составов ZnMgSSe составила 0,439 – 0,742.

Таблица 2

Значения ΔE_c для образца № 458

Метод	Положение исследуемой области на поверхности покровного слоя	ΔE_c , мэВ
ТРСГУ		396±20
ЛТРСГУ с АСМ	Центр образца	392±20
ЛТРСГУ с АСМ	Край образца	432±20

Четвертая глава посвящена апробации методики комплексной диагностики диодных квантово-размерных гетероструктур с использованием спектроскопии низкочастотного шума и комплексного исследования DUWELL InAs/InGaAs/GaAs структуры с квантовыми ямами и слоями квантовых точек. Использовался тестовый образец приборного качества – диодная структура Шоттки на основе гетероперехода Au/n-GaAs/InGaAs/n-GaAs с квантовой ямой. Структура образца: на n^+ -GaAs подложке выращен методом эпитаксии из молекулярных пучков буферный слой n-GaAs толщиной 300 нм с уровнем легирования кремнием $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, затем барьерный слой n-GaAs толщиной 300 нм с уровнем легирования кремнием $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, далее в 5 нм обкладках нелегированных слоев GaAs выращен слой квантовой ямы $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$ толщиной 7 нм между спейсерами GaAs толщиной 5 нм, после – покровный слой n-GaAs толщиной 400 нм с уровнем легирования кремнием $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Для электрических измерений были сформированы с обратной стороны подложки омический контакт и со стороны покровного слоя круглые Au контакты Шоттки диаметром 475 мкм. Зонная диаграмма образца представлена на рис. 10.

СПМ НЧ шума измерялись на частотах от 0,01 до 1000 Гц с шагом 0,01 Гц. При напряжениях смещения, при которых КЯ начинала “заходить” в ОПЗ, на спектрах СПМ наблюдалась температурная зависимость частоты излома. Это позволило сделать предположение о взаимосвязи изменения температурной зависимости вида СПМ с участием в формировании шума квантово-размерной части образца. По спектрам СПМ определялась частота излома f_b , как абсцисса точки пересечения прямых линий, построенных по методу наименьших квадратов.

На температурной зависимости логарифма частоты излома СПМ можно выделить два линейных участка, по углу наклона которых определили энергии активации процесса генерации НЧ шума (см. табл. 3).

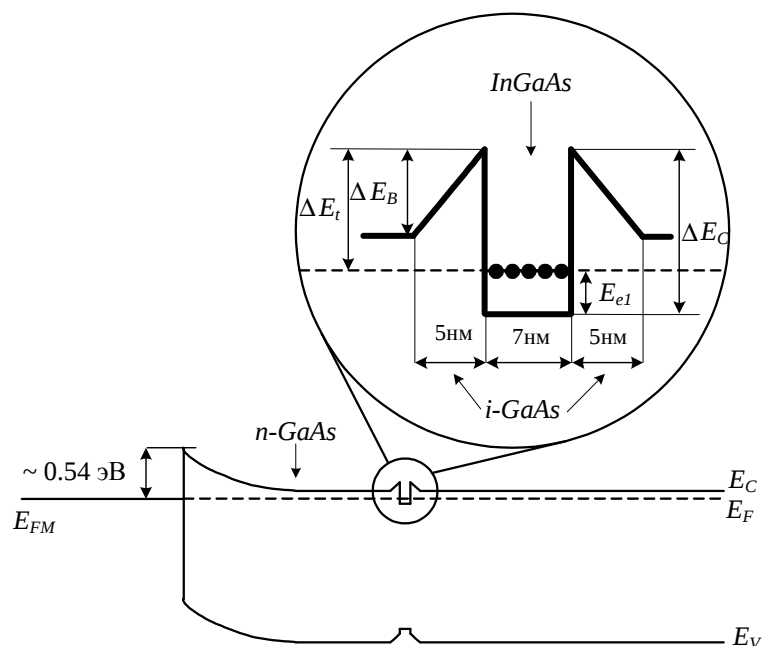


Рис. 10. Зонная диаграмма образца с КЯ

с положением края зоны проводимости в слоях GaAs, поэтому малая величина E_{a2} может характеризовать участие в генерации НЧ шума первого возбужденного уровня. Увеличение напряжения на диоде приводит к понижению потенциального барьера для эмиссии и захвата электронов в КЯ, поэтому более надежной величиной для оценки величины разрыва зоны проводимости следует использовать $E_{a1} = 148$ мэВ, что соответствует случаю, когда край ОПЗ касается КЯ. Образец был также исследован методом емкостной РСГУ. В табл. 4 представлены результаты анализа РСГУ-спектров.

Таблица 3

Значения энергий активации		
Положение границы ОПЗ:	E_{a1} , мэВ	E_{a2} , мэВ
касается КЯ	148	16
в середине КЯ	78	21
за пределами КЯ	58	19

Оценка величины разрыва зоны проводимости гетероперехода $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ по выражению $\Delta E_C(x) = 0,85 \cdot x - 0,3 \cdot x^2$ [9] для $x = 0,22$ составляет 172 мэВ, расчет энергии основного уровня размерного квантования электрона в КЯ по стандартной процедуре решения одномерного уравнения Шредингера для квантовой ямы конечной глубины дает значение $E_{e1} = 52$ мэВ. Поэтому ожидаемое значение энергии активации электронов с основного уровня энергии в КЯ будет $\Delta E_t = 120$ мэВ. Однако угол наклона прямой Аррениуса, получаемой из РСГУ измерений, пропорционален энергии ΔE_a , равной сумме энергии активации НЗ из ловушки ΔE_t и высоты потенциального барьера для захвата НЗ ΔE_B . КЯ InGaAs окружена

Данные величины энергии активации соответствуют энергетическому зазору между основным и первым возбужденным уровнями размерного квантования электронов в КЯ и краем зоны проводимости в барьерных слоях GaAs. Величина E_{a1} коррелирует с энергетическим положением основного уровня размерного квантования относительно края зоны проводимости в барьерных слоях. Минимальная погрешность определения энергии по графику Аррениуса по порядку величины составляет $k_B T$.

Первый возбужденный уровень размерного квантования практически совпадает

спейсерами i-GaAs, создающими туннельно-прозрачные потенциальные барьеры для захвата электронов, кроме этого, заполнение ямы электронами приводит к обеднению прилегающих барьерных слоев электронами, следовательно, к утолщению потенциальных барьеров, что должно приводить к увеличению регистрируемой энергии активации. При неполном заполнении КЯ электронами получается меньшее значение энергии активации – 109 мэВ, что очень близко к оценочному значению энергии активации электронов с основного уровня размерного квантования 120 мэВ.

Таблица 4

Результаты анализа РСГУ-спектров, где U_f – амплитуда импульса напряжения заполнения, U_R – амплитуда импульса напряжения опустошения

Режим измерения РСГУ-спектров	U_f , В	U_R , В	ΔE_a , мэВ (в координатах $\ln(e_n/T^2) - 1/T$)	ΔE_a , мэВ (в координатах $\ln(e_n/T) - 1/T$)
Полное заполнение КЯ, полное опустошение	0	–4	155±20	173±20
Полное заполнение КЯ, частичное опустошение	–2,3	–3	153±20	174±20
Частичное заполнение КЯ, полное опустошение	–3	–4	93±20	109±20

Апробированная методика спектроскопии низкочастотного шума была применена для изучения DUWELL структуры приборного качества с активными слоями квантовых точек InAs, синтезированной для получения лазерного излучения длиной волны 1,3 мкм (рис. 11).

Полученные результаты были использованы для уточнения потенциального рельефа вблизи слоя квантовых точек. РСГУ-спектры содержали интенсивные пики вследствие эмиссии дырок с основного состояния в слое КТ InAs. В процессе эмиссии дырок с основного состояния в слое КТ InAs и основного уровня размерного квантования в КЯ InGaAs темп эмиссии будет определяться суммарной высотой потенциальных барьеров на границах раздела слой КТ – слой КЯ, слой КЯ – спейсер, спейсер – слой p-AlGaAs.

Сопоставление измеренных значений энергии активации с ожидаемыми величинами потенциальных барьеров для электронов и дырок на основании литературных данных позволяет утверждать, что величины энергии активации 483 мэВ коррелируют с энергетическим зазором между основным состоянием дырки в слое КТ и краем валентной зоны в p-AlGaAs, а величина 453 мэВ – с энергетическим зазором между основным уровнем размерного квантова-

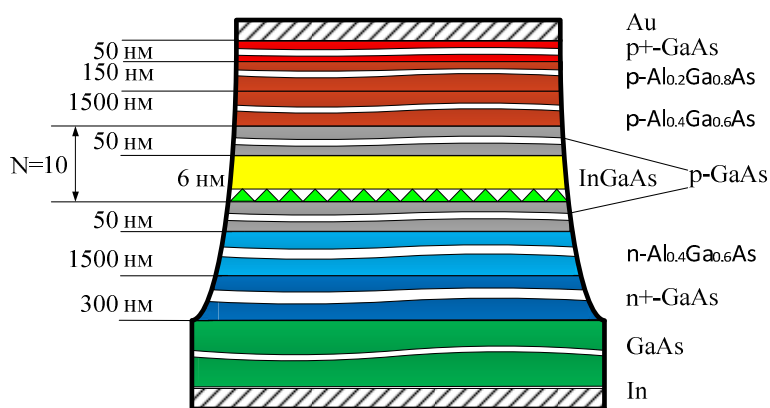


Рис. 11. DUWELL-структура с 10-кратно повторяющимися слоями квантовых ям $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ и квантовых точек InAs

ния дырок в КЯ InGaAs и краем валентной зоны в p-AlGaAs соответственно.

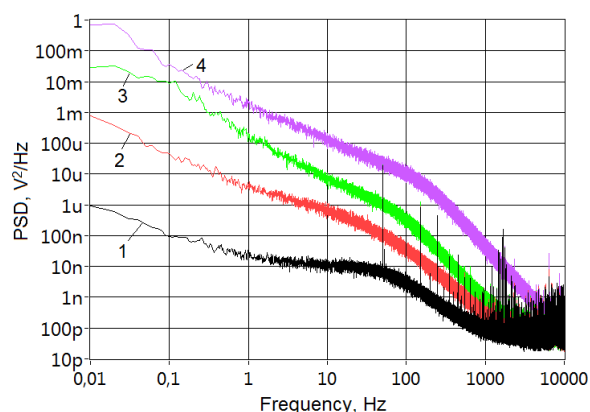


Рис. 12. СПМ НЧ шума образца DUWELL-структуры при $T = 300$ К: 1 – 1,6 В, 2 – 3,2 В, 3 – 4,8 В, 4 – 9,6 В

Измерения СПМ НЧ шума показали, что на СПМ наблюдается излом, положение которого по частоте изменялось при изменении температуры образца в диапазоне 120 - 300 К. На рис. 12 приведены СПМ при разных напряжениях на образце при комнатной температуре. При смещении 0 В положение излома по частоте не зависело от температуры. При определенной величине напряжении обратного смещения квазиуровень Ферми пересекает энергетический уровень, соответствующий основному состоянию размерного квантования дырок в КТ, что приводит к возникновению генерационно

рекомбинационного шума. По углу наклона прямой Аррениуса, построенной в координатах логарифма частоты излома от обратной температуры определили энергию активации процесса возникновения генерационно – рекомбинационного НЧ шума, которая показана в табл. 5.

Таблица 5

Рассчитанные энергии активации

Напряжение на образце, В	E_a , мэВ
3,2	487 ± 20
4,8	469 ± 20

Пятая глава диссертации посвящена апробации и применению методики локального исследования профиля концентрации свободных носителей заряда в полупроводниковых материалах и структурах.

Для апробации методики использовался тестовый образец приборного качества, представляющий собой диодную полупроводниковую гетероструктуру с тремя квантовыми ямами, погруженными в базу, отличающихся составом твердого раствора и, следовательно, энергетическим спектром электронов. Данная структура была получена методом эпитаксии из молекулярных пучков. На подложке n^+ -GaAs был выращен буферный слой n-GaAs толщиной 300 нм, легированный Si с концентрацией $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. На него осаждался слой n-GaAs толщиной 150 нм и уровнем легирования кремнием $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Затем осаждался 5 нм слой i-GaAs, на котором выращивался 7 нм слой квантовой ямы InGaAs. На слой КЯ осаждался 5 нм слой i-GaAs и снова слой n-GaAs толщиной 150 нм и уровнем легирования кремнием $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Далее подобным образом были выращены еще две квантовые ямы, ямы содержали 22, 16 и 11,5 % In. Сверху на структуру осаждался покровный слой n-GaAs толщиной 400 нм и уровнем легирования кремнием $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Образец исследовался традиционными методами C-V, I-V, РСГУ. Результаты, полученные традиционными методами, сравнивались с результатами измерения локальных C-V и I-V с помощью разработанного макета измерительной установки на базе АСМ. Локальные вольт-фарадные характеристики (ВФХ) измерялись с использованием проводящих зондов с диаметром острия 50 нм, 10,6 мкм.

Измерение локальной ВФХ при использовании зонда с радиусом закругления 25 нм, что соизмеримо с длиной Дебая 24,9 нм для уровня легирования покровного слоя тестового образца $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, показало, что зависимость емкости от напряжения становится менее выраженной, чем в случае использования зонда, обеспечивающего контакт диаметром 10,6 мкм (рис. 13). Для вычисления ВФХ по токовому отклику на пилообразный импульс напряжения со скоростью нарастания 10^6 В/с выделялась постоянная составляющая тока 0,1 нА.

Из рис. 13 видно, что для размера острия зонда, соизмеримого с длиной Дебая, меняется характер С-V зависимости, что описывается в рамках модели точечного барьерного контакта со сферической симметрией распределения электрического поля. Оценка уровня легирования по ВФХ точечного контакта с использованием соответствующих выражений дало величину $2,4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, что несколько ниже истинного значения концентрации. Это может быть связано с неточным определением площади точечного барьерного контакта. Расчет уровня легирования по С-V характеристике контакта диаметром 10,6 мкм в рамках плоской модели барьера Шоттки дало величину $3,1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, что соответствует известным данным о тестовом образце.

Таким образом, экспериментально показана целесообразность использования рассмотренной модели точечного барьерного контакта.

При использовании локальной ТРСГУ для исследования процессов эмиссии электронов из КЯ в данном тестовом образце концентрация электронов оценива-

лась из классического выражения для плоского контакта $i(t) = \frac{eSN_t w_R}{2\tau_n} \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right)$

[7] и выражения (11).

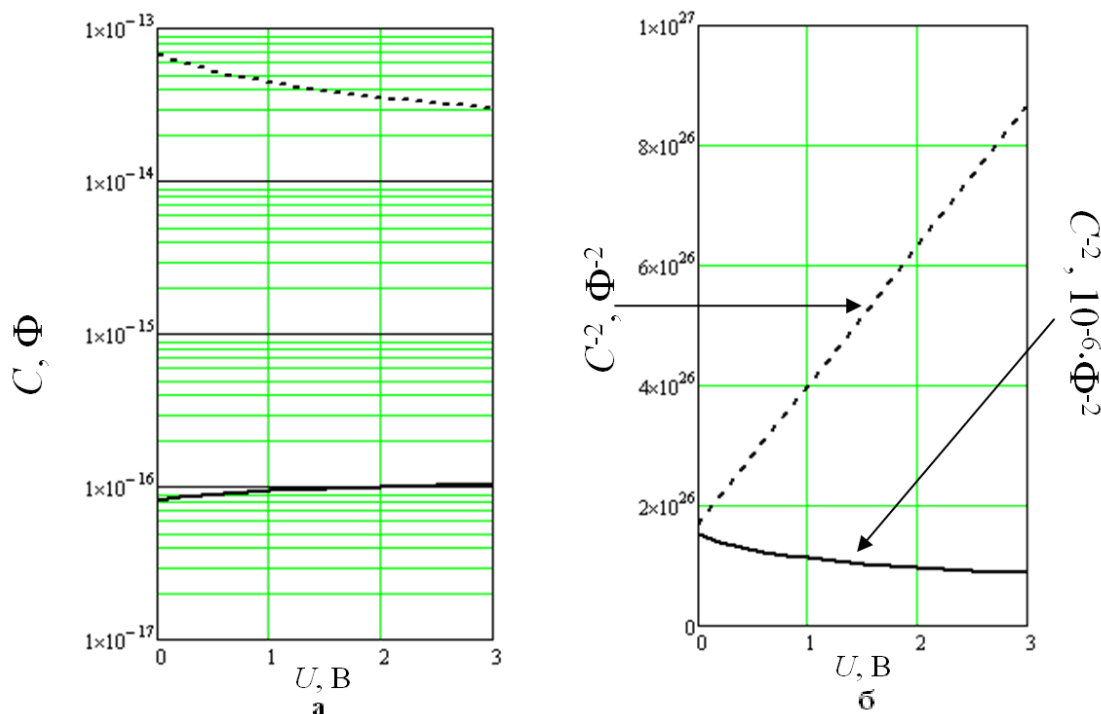


Рис. 13.: а – ВФХ точечного барьерного контакта; б – зависимость квадрата обратной емкости от обратного напряжения; сплошная линия соответствует диаметру контакта 50 нм, пунктирная кривая соответствует диаметру контакта 10,6 мкм

Экспериментально определенная величина концентрации электронов в первой КЯ, оцененная по начальной величине тока релаксации в момент времени $t = 0$

при использовании зонда с радиусом острия 25 нм с использованием классического выражения, справедливого для плоского контакта, дает заниженное в 1,5-2 раза значение. Это связано с тем, что при одном и том же обратном напряжении на плоском контакте толщина ОПЗ больше, чем размеры полусферической ОПЗ в контакте со сферической симметрий распределения электрического поля. Выражение (11) дает оценку концентрации, близкую к полученной методом ВФХ.

Апробированная на тестовом образце методика получения локальной ВФХ использовалась для исследования профиля концентрации в кремниевом фотоэлектрическом преобразователе с текстурированной поверхностью.

В качестве экспериментальных образцов выбраны пластины p-Si с концентрацией бора 10^{17} см^{-3} , прошедшие процедуру текстурирования поверхности методом жидкостного химического травления. Текстурирование кремния осуществлялось с помощью раствора гидроокиси калия и изопропилового спирта. На поверхности появлялись пирамиды с размерами основания 3,5 – 5 мкм. Далее структура подвергалась температурной обработке при температуре 83 °С. Диффузию фосфора проводили при температуре 830 °С в течение 3 мин из газовой фазы оксихлорида фосфора (POCl_3). В результате проведения диффузии фосфора на поверхности кремниевой пластины толщиной около 200 мкм формируется слой n-типа, проникающий на глубину менее 0,5 мкм с концентрацией фосфора на поверхности порядка 10^{20} см^{-3} . По полученным локальным ВФХ был построен профиль распределения концентрации свободных носителей заряда в структуре. Обнаружена зависимость измеряемой локальной ВФХ от рельефа структурированной поверхности, которую можно объяснить влиянием рельефа поверхности на рельеф границы раздела n^+ -p-перехода. Формально рассчитываемая в приближении обедненного слоя плоского барьерного контакта величина концентрации дырок в разных точках профиля распределения увеличивается на 20-30 % при изменении положения точечного контакта проводящим зондом АСМ от основания пирамидки к ее вершине.

Шестая глава посвящена исследованию электрофизических свойств солнечного элемента на основе сложного гетероперехода типа НИТ. Для комплексного исследования электрофизических свойств и уточнения параметров энергетической зонной диаграммы была выбрана НИТ-структура $\text{Ag/ITO/a-Si:H(p)/a-Si:H(i)/c-Si(n)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n+)/ITO/Ag}$. Толщина фотоактивного слоя кристаллического кремния составляла 180 мкм, слои a-Si:H(p) и a-Si:H(n) имели толщину 10 нм каждый, буферные слои a-Si:H(i) толщиной 3 нм формировались между подложкой c-Si(n) и слоями a-Si:H(p) и a-Si:H(n). Сверху и снизу структуры поверх слоев легированного аморфного гидрогенизированного кремния нанесены тонкие слои ITO (Indium tin oxide) толщиной 120 нм и сформированы омические Ag контакты для проведения электрических измерений.

Выращенные структуры были изучены методами токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней и методом вольт-фарадных характеристик. На рис. 14 показаны полученные ТРСГУ спектры НИТ-структуры. На каждом спектре наблюдается по три пика. В табл. 6 представлены параметры обнаруженных электрически активных ГУ. Обнаруженные пики на спектрах связаны с процессами эмиссии НЗ в слоях a-Si:H(i) и a-Si:H(p). Таким образом, энергетический интервал между уровнем Ферми и потолком валентной зоны в a-Si:H(p) составляет 0,36 эВ. Энергетический интервал между уровнем Ферми на границе раздела a-Si:H(i)/c-Si(n) и зоной проводимости вблизи границы раздела со слоем c-Si(n) равен 0,72 эВ при комнатной температуре (рис. 15).

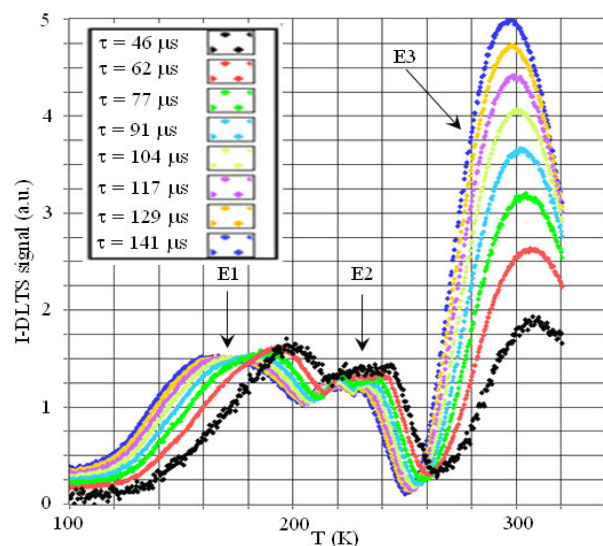


Рис. 14. ТРСГУ-спектры НІТ структуры, полученные с использованием весовой функции “lock-in” для разных величин времени релаксации τ

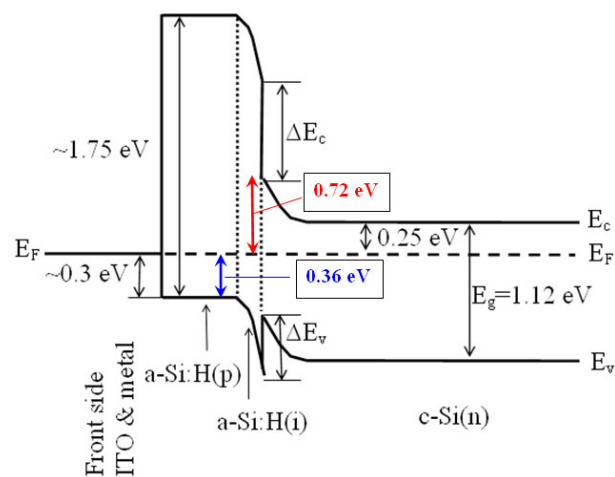


Рис. 15. Фрагмент зонной диаграммы НІТ структуры с уточненными параметрами. В квадратных рамках указаны определенные методом ТРСГУ параметры зонной диаграммы

Таблица 6

Параметры ГУ, полученные из ТРСГУ-спектров

ГУ	$E1$	$E2$	$E3$
Энергия активации ΔE_t (эВ)	$0,07 \pm 0,02$	$0,36 \pm 0,02$	$0,72 \pm 0,03$
Слоевая концентрация $N_t \cdot d$ (см ⁻²)	$1,7 \cdot 10^{10}$	$1,4 \cdot 10^{10}$	$3,9 \cdot 10^{10}$

По результатам комплексного исследования уточнены параметры зонной диаграммы реальной НІТ структуры. Уточнены положения уровней Ферми в слое a-Si:H(p) и на границе раздела a-Si:H(i)/c-Si(n).

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы.

Результаты теоретических разработок и экспериментальных исследований, обсуждаемых в диссертационной работе, представляют фундаментальный и практический интерес, могут быть использованы для диагностики существующих и новых наноматериалов, микро- и наноструктур при разработке новой элементной базы микро- и нанoeлектроники и отработке технологии изготовления. Это позволит создавать новое быстродействующее телекоммуникационное радиоэлектронное оборудование для развития цифровой экономики.

Разработанные методики локальной диагностики были апробированы на новых перспективных полупроводниковых материалах. Они расширяют возможности традиционных электрических методов диагностики и сканирующей зондовой микроскопии. Комплексное применение новых разработанных методик дает преимущество в виде повышения локальности исследований (пространственного разрешения), использования уточненных математических моделей барьерных структур для повышения достоверности интерпретации изучаемых физических явлений. Они могут быть использованы при проведении комплексных исследований полупроводниковых структур с развитой поверхностью, сложных гетероструктур на основе

аморфных, микрокристаллических и кристаллических полупроводников, гетероструктур с квантовыми ямами и квантовыми точками. Результаты исследований могут быть использованы в различных научно-исследовательских лабораториях и организациях, занимающихся проблемами физики полупроводников и физического материаловедения, производством изделий микро- и наноэлектроники.

1. Проанализирована и уточнена электромеханическая модель точечного барьерного контакта металл-полупроводник, образованного проводящим зондом с конечной величиной радиуса закругления острия и полупроводниковым материалом. Получены математические соотношения для расчета электрического потенциала и емкости точечного барьерного контакта металл-полупроводник в приближении неполного обеднения свободными носителями заряда вблизи границы области пространственного заряда в полупроводнике и с учетом размера металлического контакта. Рассчитаны и проанализированы теоретические зависимости электрического потенциала и барьерной емкости точечного барьерного контакта металл-полупроводник от концентрации свободных носителей заряда в полупроводнике, радиуса закругления острия зонда атомно-силового микроскопа, который использовался для создания точечного барьерного контакта.

2. Получены математические соотношения, учитывающие конфигурацию точечного барьерного контакта и исследуемой полупроводниковой микро- или наноструктуры, для реализации разработанного метода локальной токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней. Математические соотношения описывают релаксацию электрического тока через точечный барьерный контакт полупроводниковой структуры, для формирования которого используется проводящий зонд сканирующего зондового микроскопа.

3. Получено математическое соотношение, учитывающее степень заполнения уровней размерного квантования носителями заряда и описывающее частотную и температурную зависимости спектральной плотности мощности низкочастотного шума, генерируемого при захвате и эмиссии носителей заряда с энергетических уровней размерного квантования в квантовой яме полупроводниковой барьерной структуры.

4. 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 времени релаксации электрического тока рассчитывать энергию активации электронных состояний в областях микро- и наноструктур, размеры которых определяются большей из двух величин: длиной Дебая или диаметром закругления зонда АСМ.

5. Разработаны алгоритмы проведения исследований и измерительный комплекс спектроскопии низкочастотного шума (в диапазоне частот 0,01 – 10000 Гц), спектроскопии адмиттанса, методов вольт-фарадных характеристик (в диапазоне частот тестового сигнала 20 Гц – 2 МГц) и вольт-амперных характеристик (в диапазоне токов 1 фА – 10 мА, диапазон напряжений 1 мВ – 100 В), позволяющий проводить исследования в диапазоне температур 7-500 К.

6. Разработана методика измерения вольт-фарадной характеристики полупроводниковой барьерной структуры, основанная на измерении токового отклика в образце при подаче на него импульсного напряжения пилообразной формы. Для реализации методики измерения вольт-фарадной характеристики полупроводниковой барьерной структуры изготовлен измерительный комплекс с использованием атомно-силового микроскопа с возможностью измерять электрическую емкость в

диапазоне от 100 аФ до 100 пФ. Отличительной особенностью методики является использование проводящего зонда АСМ для формирования точечного барьерного контакта металл-полупроводник и дальнейшего измерения его вольт-фарадной характеристики. Разработано программное обеспечение для автоматизации проведения исследований, записи и хранения экспериментальных данных.

7. Разработан макет установки токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней, позволяющий измерять минимальную концентрацию ГЦ на уровне $8 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$. Макет установки позволяет работать в режиме локальной токовой РСГУ с преобразованием Лапласа. Проведена оценка погрешности определения энергии активации ГУ, которая составляет не более $2k_B T$.

8. Апробирован метод локальной токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней. Разработан способ контроля распределения величины энергии активации носителей заряда вдоль поверхности исследуемой полупроводниковой микро- или наноструктуры, параллельной гетерограницам, основанный на совместном использовании токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней и атомно-силовой микроскопии. Латеральное разрешение в пределе определяется диаметром острия проводящего зонда атомно-силового микроскопа, достигает величин 10-100 нм. На примере структуры $\text{Zn}_{0.4}\text{Cd}_{0.6}\text{S}/\text{ZnS}_{0.06}\text{Se}_{0.94}$ с квантовой ямой измерены величины разрыва зоны проводимости в разных точках поверхности образца размерами $10 \times 20 \times 0,4 \text{ мм}^3$ (длина $\times$ ширина $\times$ толщина). Величина разрыва зоны проводимости изменялась от 391 до 431 мэВ. Использование данного метода позволяет оценивать качество гетероструктур, изучать микро- и макронеоднородности распределения величин разрывов разрешенных энергетических зон по площади подложки, на которой были выращены эпитаксиальные слои. Показано, что с помощью разработанного метода локальной ТРСГУ можно изучать процессы эмиссии носителей заряда из нескольких (менее 10) квантовых точек. На примере полупроводниковой гетероструктуры CdSe/ZnSe с квантовыми точками по температурной зависимости времени релаксации электрического тока через структуру экспериментально определена энергия активации процесса эмиссии электронов из квантовых точек, которая составила $620 \pm 20 \text{ мэВ}$.

9. Проведена оценка параметра разрыва зоны проводимости в высокоомных гетероструктурах $\text{ZnSSe}/\text{ZnMgSSe}$ с квантовыми ямами, изопериодичных к кристаллической решетке GaAs с шириной запрещенной зоны барьерных слоев ZnMgSSe около 3 эВ при комнатной температуре на основе данных, полученных при исследовании низкотемпературной катодолюминесценции и ТРСГУ. В спектрах ТРСГУ обнаружены пики, обусловленные эмиссией электронов из КЯ, энергии активации которых коррелируют с положениями линий излучения барьерного слоя ZnMgSSe в спектре КЛ. Параметр разрыва зоны проводимости составляет около 0,72. Обнаружен потенциальный барьер для захвата электронов в КЯ, который является причиной относительно плохого транспорта носителей из барьерных слоев в КЯ. Величина этого барьера не коррелирует со степенью распада твердого раствора ZnMgSSe и связана, вероятно, с образованием точечных дефектов вблизи КЯ.

10. Апробирована комплексная методика исследования полупроводниковых наноструктур с использованием спектроскопии НЧ-шума. На примере тестового образца диодной структуры Шоттки с одиночной квантовой ямой $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{GaAs}$ определена величина энергии активации электронов с основного уровня размерного квантования в структуре 148 мэВ. По энергии активации

электронов рассчитана величина разрыва зоны проводимости для структуры $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{GaAs}$, которая составила 187 ± 5 мэВ.

11. Проведены комплексные исследования ряда сложных гетероструктур для уточнения параметров зонных диаграмм. НИТ структура $\text{Ag}/\text{ITO}/\text{a-Si:H(p)}/\text{a-Si:H(i)}/\text{c-Si(n)}/\text{a-Si:H(i)}/\text{a-Si:H(n+)}/\text{ITO}/\text{Ag}$ исследовалась методами вольт-фарадных характеристик и токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней. Результаты комплексных исследований перечисленными методами были использованы для определения особенностей зонной диаграммы реальной НИТ структуры. Методом ТРСГУ исследована температурная зависимость процессов эмиссии носителей заряда с энергетических уровней, расположенных в нанометровых локальных областях сложной гетероструктуры. По результатам комплексного исследования уточнены параметры зонной диаграммы реальной НИТ структуры. Уточнены положения уровней Ферми в слое a-Si:H(p) и на границе раздела $\text{a-Si:H(i)}/\text{c-Si(n)}$. Энергетический интервал между уровнем Ферми и потолком валентной зоны в a-Si:H(p) составил $0,36 \pm 0,02$ эВ. Энергетический интервал между уровнем Ферми на границе раздела $\text{a-Si:H(i)}/\text{c-Si(n)}$ и зоной проводимости вблизи границы раздела со слоем c-Si(n) равна $0,72 \pm 0,03$ эВ при комнатной температуре. Определена величина энергии активации процесса эмиссии дырок 487 ± 20 мэВ из слоя квантовых точек InAs в гетероструктуре DUWELL с множественными квантовыми ямами и погруженными в них слоями квантовых точек на основе системы $\text{InAs}/\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$, предназначенной для изготовления лазера с рабочей длиной волны 1,3 мкм, по температурным зависимостям спектров низкочастотных шумов. Полученные данные подтверждены независимым способом емкостной релаксационной спектроскопии глубоких уровней и были использованы для уточнения параметров зонной диаграммы.

12. Апробирована методика измерения локальной вольт-фарадной характеристики с использованием тестовой структуры на основе гетероперехода $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ с тремя квантовыми ямами, выращенной методом эпитаксии из молекулярных пучков. На основе измеренной локальной вольт-фарадной характеристики рассчитан «кажущийся» профиль распределения концентрации свободных электронов с характерными пиками концентрации, пространственное положение которых совпадает с пространственным положением квантовых ям в исследуемом образце. Получены профили концентрации свободных носителей заряда в кремниевой p - n -структуре с пирамидальной структурированной поверхностью с высотой пирамид до 5 мкм, используемой для производства солнечных элементов. Рассчитываемый в приближении обедненного слоя плоского барьерного контакта профиль концентрации свободных носителей заряда – дырок вблизи p - n -перехода со стороны области базы зависит от места формирования точечного барьерного контакта. Формально рассчитываемая в приближении обедненного слоя плоского барьерного контакта величина концентрации дырок в разных точках профиля распределения увеличивается на 20-30 % при изменении положения точечного контакта проводящим зондом АСМ от основания пирамидки к ее вершине.

Список цитированной литературы

1. Мошников В.А., Спивак Ю.М., Алексеев П.А., Пермяков Н.В. Атомно-силовая микроскопия для исследования наноструктурированных материалов и приборных структур // учеб. пособие. СПб.: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 144 с.
2. Matey J.R. and Blanc J. Scanning capacitance microscopy // Journal of Applied Physics V.57, 1985. P. 1437-1444.

3. Shijie Wu, Jing-Jiang Yu Attotfarad Capacitance Measurement with Scanning Microwave Microscopy. Application Note. – Agilent Technologies. 2010. P. 5990-5702.
4. Поляков В.В. Контактная сканирующая емкостная микроскопия большемерных образцов // Научное приборостроение. 2009. Т. 19. № 3. С. 62-66.
5. Анкудинов А.В. Диагностика наноустройств методами сканирующей зондовой микроскопии: Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Санкт-Петербург, 2015. 303 с.
6. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах. Кн. 1. М.: Мир, 1984. 456 с.
7. Берман Л.С., Лебедев А.А. Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках. Л.: Наука. 1981, 176 с.
8. Брунков П.Н. Емкостная спектроскопия электронных состояний в гетероструктурах с квантовыми ямами и квантовыми точками: Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Санкт-Петербург: ФТИ им. Иоффе, 2007. 315 с.
9. Зубков В.И. Диагностика полупроводниковых наногетероструктур методами спектроскопии адмиттанса. СПб.: ООО «Техномедиа»; изд-во «Элмор», 2007. 220 с.
10. Lang D.V. Deep level transient spectroscopy: a new method to characterize traps in semiconductors // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. P. 3023-3032.
11. 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.
12. Жигальский Г.П. Флуктуации и шумы в электронных твердотельных приборах. М.: Физматлит. 2012. 512 с.

Список основных публикаций по теме диссертации

Публикации из перечня ВАК

1. Садофьев Ю.Г., Литвинов В.Г. Исследование электрофизических свойств гетероэпитаксиальных слоев ZnSe на GaAs(001) // Неорганические материалы. 2000. Т. 36. № 12. С. 1432-1437.
2. Козловский В.И., Литвинов В.Г., Садофьев Ю.Г. Разрыв зон в структурах с одиночной квантовой ямой $Zn_{1-x}Cd_xTe/ZnTe$, выращенных на GaAs(100) эпитаксией из молекулярных пучков // ФТП. 2000. Т. 34. Вып. 8. С. 998-1003.
3. Козловский В.И., Садофьев Ю.Г., Литвинов В.Г. Разрывы зон в квантово-размерных структурах на основе Zn(Cd)Te, Zn(Cd)Se: расчет и эксперимент // Известия АН, Сер. физическая. 2001. Т. 65. № 2. С. 298-301.
4. Козловский В.И., Садофьев Ю.Г., Литвинов В.Г., Санников Д.А. Релаксационная спектроскопия глубоких уровней и катодолюминесценция структур с массивом квантовых точек на основе CdSe/ZnSe // Перспективные материалы. 2003. № 4. С. 42-47.
5. Литвинов В.Г., Милованова О.А., Рыбин Н.Б. Электрофизические свойства квантово-размерных структур на основе селенидов, сульфидов цинка, кадмия, магния // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. (Приложение). 2009. № 4. Вып. 30. С. 39-46.
6. Литвинов В.Г., Гудзев В.В., Милованова О.А., Рыбин Н.Б. Релаксационная спектроскопия глубоких уровней микро- и наноструктур // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2009. № 4. Вып. 30. С. 62-70.
7. 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 Рязанского государственного радиотехнического университета. 2011. № 3. Вып. 37. С. 72-80.
8. 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 Рязанского государственного радиотехнического университета. 2011. № 3. Вып. 37. С. 80-87.
9. Ермачихин А.В., Кострюков С.А., Литвинов В.Г., Рыбин Н.Б. Исследование шумовых свойств и электронных состояний диода Шоттки на основе гетероструктуры InGaAs/GaAs с квантовой ямой // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2012. Вып. 41. № 3. С. 98-103.

10. Литвинов В.Г., Рыбин Н.Б. Токовая релаксационная спектроскопия глубоких уровней в полупроводниковых структурах на основе точечного барьерного контакта // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2012. Вып.42. Часть 2. № 4. С. 28-33.
11. Литвинов В.Г., Ермачихин А.В., Кусакин Д.С. DLTS исследование диода Шоттки на основе гетероструктуры InGaAs/GaAs с квантовой ямой // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. Вып. 44. № 2. С. 91-96.
12. 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.
13. 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.
14. Литвинова В.С., Литвинов В.Г. Векторный анализ электрической цепи наноконтакта металл – полупроводник // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. Вып. 47. № 1. С. 116-120.
15. Ермачихин А.В., Литвинов В.Г. LabVIEW в современной индустрии измерений (обзор) // Информационные технологии. 2014. № 3. С. 25-29.
16. 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 InGaAs/GaAs методами спектроскопии адмиттанса // ФТП. 2014. Т. 48. Вып. 7. С. 944-950.
17. 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.
18. Ермачихин А.В., Кострюков С.А., Кусакин Д.С., Литвинов В.Г., Рыбин Н.Б. Шумовая спектроскопия диода Шоттки на основе гетероструктуры InGaAs/GaAs с квантовой ямой // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. Вып. 49. № 3. С. 83-89.
19. Кусакин Д.С., Литвинова В.С., Литвинов В.Г., Воробьев Ю.В., Рыбин Н.Б. Методика локального измерения электрической емкости фемтофарадного диапазона точечного барьерного контакта металл-полупроводник // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. Вып. 50 Часть 2. № 4. С. 122-125.
20. Кусакин Д.С., Литвинов В.Г., Рыбин Н.Б., Ермачихин А.В., Воробьев Ю.В. Анализ электрических свойств точечного барьерного контакта металл-полупроводник // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. Вып. 53. №3. С. 149-153.
21. Кусакин Д.С., Литвинов В.Г. Измерение электрической емкости точечного барьерного контакта металл-полупроводник // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. Вып. 54. Часть 2. № 4. С. 132-136.
22. Кусакин Д.С., Литвинов В.Г., Ермачихин А.В. Измерительно-аналитический комплекс для локального исследования вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик полупроводников // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2016. Вып. 56. №2. С. 177-182.
23. Кусакин Д.С., Литвинов В.Г., Рыбин Н.Б., Литвинова В.С., Щелушкин В.Н., Худыш А.И. Локальное исследование C-V-характеристик солнечного элемента на основе p-Si с модифицированной поверхностью // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2017. № 61. С. 137-142.
24. Вихров С.П., Вишняков Н.В., Гудзев В.В., Литвинов В.Г., Мишустин В.Г. Исследование локализованных состояний в барьерных структурах элементов электроники на основе аморфного гидрированного кремния // Радиотехника. 2017. № 5. С. 186-192.

25. Литвинов В.Г., Холомина Т.А., Ермачихин А.В., Кострюков С.А., Логинов Д.С., Семенов А.Р. Разработка автоматизированного комплекса для исследования спектров низкочастотного шума в элементах и структурах электронной техники // Радиотехника. 2017. № 5. С. 179-185.
26. Ермачихин А.В., Литвинов В.Г. Автоматизированный измерительный комплекс токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 2. С. 118-123.
27. Вихров С.П., Вишняков Н.В., Гудзев В.В., Ермачихин А.В., Жилина Д.В., Литвинов В.Г., Маслов А.Д., Мишустин В.Г., Теруков Е.И., Титов А.С. Исследование глубоких энергетических уровней в солнечном элементе типа НІТ // ФТП. 2018. Т. 52. Вып. 7. С. 787-791.
28. Трегулов В.В., Литвинов В.Г., Ермачихин А.В. Механизмы токопрохождения в диодной структуре с n^+ -р-переходом, сформированным термической диффузией фосфора из пленки пористого кремния // Известия высших учебных заведений. Физика. 2017. Т. 60. № 9. С. 94-99.
29. Трегулов В.В., Литвинов В.Г., Ермачихин А.В. Исследование механизмов токопрохождения в гетероструктуре CdS/por-Si/p-Si // ФТП. 2018. Т. 52. № 7. С. 751-756.

Охранные документы

1. Патент на изобретение № 2415389. Способ исследования энергетического спектра электронных состояний и устройство для его осуществления / Н.В. Вишняков, В.Г. Литвинов, О.А. Милованова, Н.Б. Рыбин. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 27.03.2011 г. Заявка: 2009131644/28. Приоритет(ы): Дата подачи заявки: 21.08.2009. Дата публикации заявки: 27.03.2011 Бюл. № 9.
2. Патент на изобретение № 2493631. Способ обнаружения квантовых точек и устройство для его осуществления / В.А. Линьков, С.П. Вихров, Н.В. Вишняков, В.Г. Литвинов. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 20.09.2013 г. Заявка: 2012113955/28. Приоритет(ы): Дата подачи заявки: 11.04.2012 г. Дата публикации заявки: 27.03.2011 Бюл. № 26.
3. Патент на изобретение № 2534382. Способ определения концентрации носителей заряда в полупроводниках и устройство для их осуществления / А.А. Корнилович, В.Г. Литвинов, А.В. Ермачихин, Д.С. Кусакин. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 30 сентября 2014 г. Заявка: 2013118609/28 Приоритет(ы): Дата подачи заявки: 23.04.2013 г. Дата публикации заявки: 27.10.2014 Бюл. № 30.
4. Программа для автоматизированного сбора и обработки на ЭВМ экспериментальных данных токовой и емкостной релаксационной спектроскопии глубоких уровней: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2004610117. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 5 января 2004 г. / А.В. Лабутин, В.Г. Литвинов.
5. 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. / А.В. Ермачихин, В.Г. Литвинов, С.А. Кострюков, С.И. Мальченко.
6. Программа для моделирования спектров релаксационной спектроскопии глубоких уровней полупроводниковых диодных структур: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: № 2013611095. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 9 января 2013 г. / А.В. Ермачихин, В.Г. Литвинов, С.И. Мальченко, Н.Б. Рыбин.
7. Программа для построения и обработки спектров релаксационной спектроскопии глубоких уровней полупроводниковых диодных структур: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: № 2013611098. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 9 января 2013 г. / А.В. Ермачихин, В.Г. Литвинов, С.И. Мальченко, Н.Б. Рыбин.
8. 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. / А.В. Ермачихин, В.Г. Литвинов, Н.Б. Рыбин.

9. Программа для реализации метода регуляризации Тихонова: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: № 2014615727. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 30 мая 2014 г. / А.В. Ермачихин, В.Г. Литвинов, М.С. Ашапкина.
10. 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. / А.В. Ермачихин, Н.Б. Рыбин, В.Г. Литвинов, Н.В. Рыбина.
11. Программа для исследования электрически и оптически активных дефектов в диодных структурах: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: № 2015617376. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 8 июля 2015 г./ А.В. Ермачихин, В.Г. Литвинов, Д.С. Кусакин, Н.В. Вишняков, В.В. Гудзев.
12. Программа управления измерительной установкой для комплексной диагностики полупроводниковых материалов, микро- и наноструктур: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: № 2015617884. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 23 июля 2015 г. / Д.В. Алмазов, Н.В. Вишняков, В.Г. Литвинов, В.Г. Мишустин, А.В. Ермачихин.
13. Программа управления измерительным комплексом токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: № 2016617846. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 14 июля 2016 г / А.В. Ермачихин, В.Г. Литвинов.
14. Программа управления измерительным комплексом для локального исследования вольт-фарадных характеристик полупроводниковых материалов и структур: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: № 2016618137. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 21 июля 2016 г. / Д.С. Кусакин, В.Г. Литвинов, А.В. Ермачихин.
15. Программа для анализа вольт-фарадных характеристик полупроводниковых барьерных структур: свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ № 2017616573. Зарегистрировано 08 июня 2017 г. / Д.С. Кусакин, А.В. Ермачихин, В.Г. Литвинов.

Прочие публикации (статьи, монография, материалы конференций)

1. Kozlovsky V.I., Sadofyev Yu.G., Litvinov V.G. Deep level transient spectroscopy and cathodoluminescence of $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te}/\text{ZnTe}$ QW structures grown on GaAs(100) by MBE // J. Cryst. Growth. 2000. V. 214/215. P. 983-987.
2. Kozlovsky V.I., Sadofyev Yu.G., Litvinov V.G. Band alignment in $\text{ZnCdTe}/\text{ZnTe}$ and $\text{ZnCdSe}/\text{ZnSe}$ SQW structures grown on GaAs(100) by MBE // Nanotechnology. 2000. V.11. No.4. P. 241-245.
3. Litvinov V.G., Kozlovsky V.I., Sadofyev Yu.G. Deep-level transient spectroscopy and cathodoluminescence of the CdSe/ZnSe QD structures grown on GaAs(100) by MBE // Phys. Stat. Sol. (b). 2002. V. 229. No.1. P. 513-517.
4. Kozlovsky V.I., Litvinov V.G., Sadofyev Yu.G. E-beam irradiation effect on CdSe/ZnSe QD formation by MBE: deep level transient spectroscopy and cathodoluminescence studies // J. Phys.: Condens. Matter. V.16. 2004. P.133-140.
5. Kozlovsky V.I., Sannikov D.A., Litvinov V.G. Cathodoluminescence and Current DLTS of MOVPE-grown $\text{ZnCdS}/\text{ZnSSe}$ SQW Structures // Journal of the Korean Physical Society, V.53, No.5, November 2008, P.2864-2866.
6. Litvinov V., Kozlovsky V., Sannikov D., Sviridov D., Milovanova O., Rybin N. Local measurement of conduction band offset for $\text{ZnCdS}/\text{ZnSSe}$ nanostructure by Laplace current DLTS cooperated with AFM technique // Phys. Status Solidi C, 2010. V.7. No. 6. P. 1536–1538.
7. Litvinov V., Kozlovsky V., Sadofyev Y., Rybin N. Local study of the energy spectrum of electrons in CdSe/ZnSe QD structure by current DLTS cooperated with AFM //Physica Status Solidi (C). 2012. V. 9. No.(8-9), P. 1772-1775.
8. Litvinov V.G., Ermachikhin A.V., Rybin N.B., Vishnyakov N.V., Vikhrov S.P. Complex Method of Diagnostics of Diode-Like Quantum Well Heterostructures with Use of Low Frequency Noise Spectroscopy // J. Nanoelectron. Optoelectron. Vol. 9, № 6, 2015. P. 756-761.

9. Litvinov V.G., Vishnyakov N.V., Gudzev V.V., Rybin N.B., Kusakin D.S., Ermachikhin A.V., Karabanov S.M., Vikhrov S.P., Karabanov A.S., Slivkin E.V. Investigation of the Influence of Deep-Level Defects on the Conversion Efficiency of Si-based Solar Cells // MRS Advances. Volume 1. Issue 14. 2016. P. 911 – 916.
10. Litvinov V.G., Ermachikhin A.V., Kusakin D.S., Vishnyakov N.V., Gudzev V.V., Karabanov S.M., Karabanov A.S., Vikhrov S.P. Investigation of Deep-Level Defects Lateral Distribution in Active Layers of Multicrystalline Silicon Solar Cells // MRS Advances., Volume 2. Issue 53. 2017. P. 3141-3146.
11. Литвинов В.Г., Ермачихин А.В. Исследование полупроводниковых структур комплексным методом спектроскопии низкочастотного шума: монография / Рязан. гос. радиотехн. ун-т. Рязань, 2015. 144 с.
12. Kozlovsky V.I., Sadofyev Yu.G., Litvinov V.G. Band alignment in ZnCdTe/ZnTe and ZnCdSe/ZnSe SQW structures grown on GaAs(100) by MBE // Proceedings of the 8th international symposium nanostructures: Physics and Technology, St. Petersburg, June 19-23, 2000. P.185-188.
13. Kozlovsky V.I., Sadofyev Yu.G., Litvinov V.G. Deep-level transient spectroscopy and cathodoluminescence of the CdSe/ZnSe QD structures grown on GaAs(100) by MBE // Proc. of Tenth Int. Conference on II-VI compounds, Bremen, Germany, September 9-14, 2001. P. Tu-P55.
14. Kozlovsky V.I., Sadofyev Yu.G., Litvinov V.G. E-beam irradiation effect on CdSe/ZnSe QD formation by MBE: deep level transient spectroscopy and cathodoluminescence studies // Proc. of 7th Int. Workshop on Beam Injection Assessment of Microstructures in Semiconductors, Lille, France, May 25-29, 2003.
15. 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 // сб. трудов XII международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты». Алушта, 2008. С. 86.
16. Литвинов В.Г., Вишняков Н.В., Милованова О.А., Рыбин Н.Б. Практические аспекты применения релаксационной спектроскопии глубоких уровней для характеристики полупроводниковых наноструктур // сб. трудов X международной конференции «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы». Ульяновск, 2008. С. 207.
17. 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». Ульяновск, 2008. С. 206.
18. Литвинов В.Г., Милованова О.А., Рыбин Н.Б. Практические аспекты применения релаксационной спектроскопии глубоких уровней для измерения плотности состояний в неупорядоченных полупроводниках // сб. трудов III международной конференции «Физика электронных материалов – ФИЭМ'08». Калуга, 2008. С. 275-278.
19. Литвинов В.Г., Козловский В.И., Милованова О.А., Рыбин Н.Б. Определение разрывов зон в ZnSe/ZnMgSSe структуре методами катодолуминесценции и релаксационной спектроскопии глубоких уровней совместно с атомно-силовой микроскопией // сб. трудов XI международной конференции «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы». Ульяновск, 2009. С. 210-211.
20. Litvinov V.G., Kozlovsky V.I., Sannikov D.A., Sviridov D.E., Milovanova O.A., 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.
21. Литвинов В.Г., Гришанкина Н.В., Рыбин Н.Б., Гудзев В.В. Исследование процессов эмиссии и захвата носителей заряда в р-і-п структуре а-Si:H методом токовой DLTS // сб. трудов VII международной конференции. «Аморфные и микрокристаллические полупроводники». Санкт-Петербург, 2010. С. 237-238.

22. Литвинов В.Г., Козловский В.И., Милованова О.А., Рыбин Н.Б. Разрывы разрешенных энергетических зон в наноструктурах ZnCdS/ZnSSe: теория и эксперимент // сб. трудов XII международной конференции «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы». Ульяновск, 2010. С. 36.
23. Рыбин Н.Б., Литвинов В.Г., Милованова О.А. С-V- профилирование гетероструктуры InGaAs/GaAs с тремя квантовыми ямами // сб. трудов XII международной конференции «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы». Ульяновск, 2010. С. 54.
24. 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 «Наноматериалы». Рязань, 2010. Т. 1. С. 153-157.
25. 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.
26. 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 «Диагностика наноматериалов и наноструктур». Рязань, 2011. Т. 3. С. 28-31.
27. 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 «Диагностика наноматериалов и наноструктур». Рязань, 2011. Т. 3. С. 127-129.
28. 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 «Диагностика наноматериалов и наноструктур», Рязань, 2011. Т. 3. С. 130-132.
29. 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 // сб. трудов VIII Международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники». СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. С. 163-164.
30. Ермачихин А.В., Литвинов В.Г., Мальченко С.И. Программное обеспечение измерительной установки для низкочастотной спектроскопии // сб. трудов XI Международной научно-практической конференции «Инженерные и научные приложения на базе National Instruments-2012». М.: ДМК Пресс, 2012. С. 387-389.
31. Ермачихин А.В., Литвинов В.Г., Рыбин Н.Б., Кострюков С.А. Исследование шумовых свойств диода Шоттки с квантовой ямой // сб. трудов научно-методического семинара «Флуктуационные и деградационные процессы в полупроводниковых приборах». М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, НИУ «МЭИ», 2012. С. 98-106.
32. Ермачихин А.В., Кострюков С.А., Литвинов В.Г. Усовершенствование входного усилителя измерительно-аналитического комплекса спектроскопии низкочастотного шума // сб. трудов VI Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых «Диагностика наноматериалов и наноструктур». Рязань, 2013. Т. 3. С. 51-54.
33. Ермачихин А.В., Литвинов В.Г. Виды спектров шума (цвет шума) и уменьшение «вредной» составляющей СПМ шума // сб. трудов Всероссийской молодежной школы-семинара «Диагностика наноматериалов и наноструктур». Рязань, 2013. С. 58-62.
34. 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 // сб. трудов Всероссийской молодежной школы-семинара «Диагностика наноматериалов и наноструктур». Рязань, 2013. С. 128-132.
35. 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 // сб. трудов XI Российской конференции по физике

- полупроводников (XI РКФП). СПб.: Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, 2013. С. 431.
36. Ермачихин А.В., Литвинов В.Г. Программное обеспечение измерительно-аналитического комплекса для исследования иммитанса электронных элементов в температурном диапазоне 7-500 К // сб. трудов XII Международной конференции компании National Instruments «Инженерные и научные приложения на базе технологии National Instruments 2013». Москва, 2013. С. 260-262.
37. Литвинов В.Г., Ермачихин А.В., Кусакин Д.С. Особенности исследования диода Шоттки на основе гетероструктуры InGaAs/GaAs с квантовой ямой методом DLTS // сб. трудов VI Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых «Диагностика наноматериалов и наноструктур». Рязань, 2013. Т. 3. С. 169-175.
38. Кусакин Д.С., Литвинов В.Г. Измерительный комплекс для исследования электрофизических свойств полупроводниковых структур на базе АСМ-СТМ «NTEGRA» // сб. трудов Международной научно-практической конференции «Инновации в науке, производстве и образовании», Рязань, 2013. С. 60-62.
39. Ермачихин А.В., Кострюков С.А., Литвинов В.Г. Разработка методики исследования характеристик полупроводниковых структур с квантовыми ямами с использованием спектроскопии НЧ шума // сб. трудов IX Международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники». СПб., 2014. С. 313-314.
40. Литвинов В.Г., Ермачихин А.В. Особенности применения спектроскопии низкочастотного шума для диагностики полупроводниковых диодных структур с квантовой ямой // сб. трудов VII Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых «Диагностика наноматериалов и наноструктур». Рязань, 2014. Т. 1. С. 37-50.
41. Кусакин Д.С., Литвинов В.Г., Рыбин Н.Б. Разработка методики локального измерения вольт-фарадных характеристик полупроводниковых структур с использованием зондовой системы атомно-силового микроскопа // сб. трудов VII всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых «Диагностика наноматериалов и наноструктур». Рязань, 2014. Т. 3. С. 28-31.
42. Кусакин Д.С., Литвинов В.Г. Разработка методики локального измерения вольт-фарадных характеристик полупроводниковых структур с использованием атомно-силовой микроскопии // сб. трудов IX Международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники», Санкт-Петербург, 2014. С. 274-275.
43. Литвинова В.С., Литвинов В.Г., Кусакин Д.С. Обоснование методики определения концентрации свободных носителей заряда в локальных областях полупроводниковых наноструктур по C-V-характеристикам // сб. трудов VII Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых «Диагностика наноматериалов и наноструктур». Рязань, 2014. Т. 3. С. 32-38.
44. Кусакин Д.С., Литвинов В.Г., Рыбин Н.Б. Разработка методики локального измерения вольт-фарадных характеристик полупроводниковых гетероструктур с квантовыми ямами с использованием техники атомно-силовой микроскопии // сб. трудов III Международной научно-практической конференции «Инновации в науке, производстве и образовании», ИНПО-2014. Рязань, 2014. С. 30-33.
45. Кусакин Д.С., Рыбин Н.Б., Воробьев Ю.В., Литвинов В.Г. Разработка методики измерения электрической емкости точечного барьерного контакта металл-полупроводник // сб. трудов VIII Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых «Диагностика наноматериалов и наноструктур». Рязань, 2015. Т. 3. С. 16-20.
46. Семенов А.Р., Кусакин Д.С., Литвинов В.Г. Исследование электрических характеристик точечного барьерного контакта металл-полупроводник с помощью атомно-силовой микроскопии // сб. трудов VIII Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых «Диагностика наноматериалов и наноструктур». Рязань, 2015. Т. 3. С. 203- 207.

47. Литвинов В.Г., Ермачихин А.В., Садофьев Ю.Г. Шумовая спектроскопия структуры с квантовыми ямами и слоями квантовых точек на основе InAs/InGaAs/GaAs. // сб. трудов XIX международного симпозиума «Нанопизика и наноплектроника». Том II. Нижний Новгород, 2015. С. 499-500.
48. Литвинов В.Г., Ермачихин А.В. Автоматизированный аппаратно-программный комплекс для исследования электрофизических параметров полупроводниковых структур. // сб. трудов III научно-технической конференции с международным участием «Наука настоящего и будущего» для студентов, аспирантов и молодых ученых. Санкт-Петербург, 2015. С. 20-21.
49. Ermachikhin A.V., Litvinov V.G., Maslov A.D. The measuring systems of semiconductor structures and its software // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21–23, 2015. IEEE Catalog Number: CFP15794-CDR. ISBN: 978-1-4799-7102-2.
50. Куcaкин Д.С., Литвинов В.Г. Локальное измерение электрической емкости точечного барьерного контакта металл-полупроводник с помощью атомно-силовой микроскопии // сб. трудов 18-й молодежной научной школы по твердотельной электронике «Микро- и нанотехника нового поколения». Санкт-Петербург, 2015. С. 64-66.
51. Куcaкин Д.С., Литвинов В.Г. Моделирование вольт-фарадной характеристики точечного барьерного контакта металл-полупроводник // сб. трудов XXVIII Международной научно-практической конференции «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-28». Т. 10. Саратов, 2015. С. 106-109.
52. Litvinov V.G., Vishnyakov N.V., Gudzev V.V., Mishustin V.G., Karabanov S.M., Vikhrov S.P., Karabanov A.S Measuring complex for analysis of recombination deep traps in semiconductor solar cells //Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology Seville, Spain, March 17-19th, 2015, 7125239, P. 1071-1074.
53. Куcaкин Д.С., Литвинов В.Г., Ермачихин А.В. Измерительный комплекс для локального исследования электрофизических свойств полупроводниковых наноматериалов и наноструктур // сб. трудов Международной научно-технической и научно-методической конференции «Современные технологии в науке и образовании (СТНО-2016)». Рязань, 2016. С. 248-252.
54. Куcaкин Д.С., Литвинов В.Г., Мальченко С.И. Разработка комплекса с использованием АСМ для исследования C-V и I-V характеристик полупроводниковых нанообъектов и наноструктур // сб. трудов Международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники», Санкт-Петербург, 2016. С.121-122.
55. Литвинов В.Г., Вишняков Н.В., Гудзев В.В., Ермачихин А.В., Мишустин В.Г., Вихров С.П., Теруков Е.И., Орехов Д.Л., Абрамов А.С., Аболмасов С.Н. Исследование глубоких энергетических уровней в НТ-структуре a-Si:H(p)/a-Si:H(i)/c-Si(n) // сб. трудов Международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники». Санкт-Петербург, 2016, С. 211-212.
56. Куcaкин Д.С., Ермачихин А.В., Литвинов В.Г. Измерительный комплекс для локального исследования электрофизических свойств полупроводниковых структур // сб. трудов XV Международной конференции NIDays 2016. Москва, 2016. С. 157-159.
57. Kusakin D.S., Litvinov V.G., Rybin N.B., Ermachikhin A.V., Gudzev V.V., Shchelushkin V.N., Khudysh A.I. Local investigation of capacitance-voltage characteristics of silicon solar cell with the modified surface // Proceeding 2017 6th Mediterranean conference on embedded computing (MECO). Bar, Montenegro. 11-15 June 2017. P. 324-327.
58. Litvinov V.G., Vishnyakov N.V., Gudzev V.V., Ermachikhin A.V. Maslov A.D., Karabanov A.S., Karabanov S.M., Vikhrov S.P. Investigation of Deep-Level Defects in the Active Layer of Multicrystalline Silicon Solar Cells // 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Munich, Germany. 2016. P. 1029-1032.
59. Куcaкин Д.С., Литвинов В.Г., Рыбин Н.Б. Исследование профиля концентрации носителей заряда в полупроводниковых диодных структурах с квантовыми ямами на основе

InGaAs/GaAs // сб. трудов IX Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых “Диагностика наноматериалов и наноструктур”. Рязань, 2017. Т. II. С.151-156.

60. Litvinov V.G., Ermachikhin A.V., Kusakin D.S., Vishnyakov N.V., Maslov A.D., Semenov A.R. Measurement Complex to Investigate Electrophysical and Noise Characteristics of Semiconductor Micro- and Nanostructures // 24th International Conference on Noise and Fluctuations. Vilnius, Lithuania, June 20-23, 2017. 7986021.

61. Litvinov V.G., Ermachikhin A.V., Kusakin D.S. Investigation of Band Diagram Features of the DUWELL-structure InAs/InGaAs/GaAs by DLTS and Low-frequency Noise Spectroscopy // 24th International Conference on Noise and Fluctuations. Vilnius, Lithuania, June 20-23, 2017. 7986014.

62. Kholomina T., Litvinov V., Ermachikhin A., Semenov A. Excess noise and deep level defects diagnostics in semiconductor barrier structures // 28th International Conference Radioelektronika, Radioelektronika 2018. Prague, Czech Republic, April 19-20. 2018. Pages 1-5.

63. Ermachikhin A., Litvinov V., Kholomina T., Semenov A. Low Noise Characteristics of Schottky Diode with Deep Energy Level // 25th International Conference on Noise and Fluctuations. Neuchâtel. Switzerland. June 18-21, 2019. P. 330-333.

Литвинов Владимир Георгиевич
**ЛОКАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
Подписано в печать 27.12.2019. Формат бумаги 60x84 1/16.
Авт. л. 2. Тираж 100 экз.
Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.