

На правах рукописи

БАРАНОВСКИЙ МАКСИМ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ГЕТЕРОСТРУКТУР InGaN/GaN С МНОЖЕСТВЕННЫМИ КВАНТОВЫМИ
ЯМАМИ И РАЗРАБОТКА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ
ИХ КАЧЕСТВА**

специальность 01.04.10 – физика полупроводников

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)».

Научный руководитель: Доктор физико-математических наук, профессор
Глинский Геннадий Федорович
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Официальные оппоненты:
Доктор физико-математических наук, профессор, лауреат государственной премии СССР, заслуженный деятель науки РФ
Воробьев Леонид Евгеньевич
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Кандидат технических наук
Феопёнтов Анатолий Валерьевич
ОАО «Центральный научно-исследовательский институт «Электрон»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Защита состоится «20» июня 2013 г. в __ ч. __ мин. на заседании диссертационного совета Д 212.238.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» по адресу 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)».

Автореферат разослан «17» мая 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н, профессор

Мошников В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Гетероструктуры InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами (МКЯ) в настоящее время широко используются в качестве активной области светодиодов, а также полупроводниковых лазеров, излучающих в сине-зеленой области спектра. Свойства этих гетероструктур во многом определяют параметры производимых приборов. К ним относятся спектр излучения, мощность и эффективность. Производство качественных гетероструктур InGaN/GaN связано с преодолением ряда технологических трудностей, таких как создание эпитаксиальной структуры на чужеродных подложках (нитрид галлия на сапфире), а также рост слоев GaN и InGaN, сильно рассогласованных по периоду кристаллической решетки. Это отражается на качестве создаваемых структур, что в свою очередь влияет на параметры выпускаемых приборов.

В этой связи исследование и диагностика квантово-размерных структур InGaN/GaN в последнее время становится особенно актуальным и востребованным направлением. Помимо заинтересованности производителей в повышении эффективности излучателей, данное направление представляет также определенный научный интерес. Он обусловлен тем, что к настоящему моменту не существует ясного представления о многих физических процессах в активной области излучающих структур, в частности, о механизмах транспорта носителей заряда и механизмах их излучательной и безызлучательной рекомбинации.

Диагностические методы, применяемые для исследования квантово-размерных структур, должны обладать высоким пространственным разрешением для обеспечения возможности анализа электрофизических свойств отдельных слоев. Но не менее важным требованием является неразрушающий характер внешнего воздействия на диагностируемый объект. Это позволяет проводить различные исследования на одном образце, тем самым получая наиболее полную информацию о его структуре, свойствах и механизмах тех или иных процессов.

В области неразрушающей диагностики полупроводниковых наногетероструктур свою эффективность доказал метод вольт-фарадного профилирования. В рамках настоящей диссертационной работы проводятся исследования как вольт-фарадных, так и фотоэлектрических характеристик гетероструктур InGaN/GaN с МКЯ. Результатом этих исследований явилась разработка нового неразрушающего фотоэлектрического метода диагностики таких структур, основанного на исследовании зависимости фототока от обратного напряжения. По сравнению с вольт-фарадным профилированием, данный метод обладает большим быстродействием и более высокой чувствительностью и не требует низких температур. Всё вышесказанное подчеркивает актуальность темы диссертационной работы.

Цель работы заключалась в исследовании фотоэлектрических явлений в гетероструктурах InGaN/GaN с МКЯ и разработка нового неразрушающего фотоэлектрического метода их диагностики.

Для достижения данной цели решались следующие **задачи**:

1. Разработка и создание автоматизированной установки, позволяющей измерять адмиттанс и фототок в полупроводниковых гетероструктурах в широком диапазоне температур, частот и обратных смещений.
2. Разработка программного обеспечения для автоматизации процесса измерений характеристик гетероструктур, обработки экспериментальных данных и расчета параметров исследуемых образцов.
3. Исследование зависимостей дифференциальных емкости и проводимости от прикладываемого обратного смещения в гетероструктурах InGaN/GaN с МКЯ.
4. Развитие динамической теории адмиттанса полупроводниковых барьерных структур с квантовыми ямами, основанной на самосогласованном решении уравнений Шредингера и Пуассона.
5. Исследование фототока в гетероструктурах InGaN/GaN с МКЯ и его зависимости от прикладываемого обратного напряжения при различных температурах и длинах волн оптического возбуждения.
6. Развитие теории фототока в полупроводниковых барьерных структурах, содержащих одиночные и множественные квантовые ямы.
7. Разработка методики экспресс-контроля качества гетероструктур InGaN/GaN с МКЯ по их фотоэлектрическим характеристикам.

Научная новизна работы

1. Впервые развита микроскопическая динамическая теория адмиттанса барьера Шоттки с квантовой ямой, основанная на самосогласованном решении уравнений Шредингера и Пуассона.
2. В рамках данной теории впервые описана зависимость дифференциальной проводимости от прикладываемого обратного смещения. Показано, что экспериментально наблюдаемые ступеньки в данной зависимости обусловлены соответствующими особенностями барьерной емкости.
3. Экспериментально обнаружено, что зависимость фототока от обратного напряжения в структурах InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами имеет ступенчатый характер. Показано, что ступеньки в фототоке обусловлены последовательным прохождением границы области объемного заряда p-n-перехода через квантовые ямы.

4. В структурах InGaN/GaN с МКЯ обнаружены участки отрицательной дифференциальной проводимости. Они возникают при возбуждении светом с длиной волны, соответствующей краю оптического поглощения материала квантовых ям. Показано, что данное явление связано со сдвигом края собственного поглощения, обусловленного компенсацией пьезоэлектрического поля в квантовых ямах полем р-п-перехода.

Достоверность полученных результатов подтверждается сравнительным анализом экспериментальных данных, полученных методом вольт-фарадного профилирования и фотоэлектрическим методом, результатами теоретических расчетов, а также имеющимися литературными данными.

Научная и практическая значимость работы сводится к следующему:

1. Разработана автоматизированная установка, позволяющая исследовать адмиттанс и фотоэлектрические характеристики полупроводниковых квантово-размерных структур в области температур от 8 до 400 К, в диапазоне частот от 30 Гц до 1 МГц, при обратных смещениях до 60 В.
2. Разработано и зарегистрировано программное обеспечение для автоматизации процесса измерений характеристик полупроводниковых гетероструктур, обработки и анализа экспериментальных данных, расчета наблюдаемого профиля концентрации носителей заряда в гетероструктуре по вольт-фарадным характеристикам.
3. Развита динамическая теория адмиттанса, которая позволила описать множество явлений, наблюдаемых экспериментально, в частности, зависимость дифференциальной проводимости от обратного смещения в гетероструктурах с квантовыми ямами.
4. Обнаружены ранее неизвестные особенности в фотоэлектрических характеристиках гетероструктур InGaN/GaN с МКЯ: ступенчатый характер зависимости фототока от обратного смещения, участки отрицательной дифференциальной проводимости. Показано, что данные особенности могут быть использованы для анализа свойств данных гетероструктур.
5. Предложен новый фотоэлектрический метод исследования гетероструктур InGaN/GaN с МКЯ, основанный на анализе зависимости фототока от приложенного обратного смещения.
6. Разработано и запатентовано устройство, реализующее экспресс-контроль качества полупроводниковых структур с квантовыми ямами посредством измерения и последующего анализа их фотоэлектрических характеристик.

Положения, выносимые на защиту:

1. В барьерных структурах с квантовыми ямами ступенчатый характер зависимости дифференциальной проводимости от обратного смещения обусловлен соответствующими особенностями барьерной емкости.
2. В гетероструктурах InGaN/GaN с квантовыми ямами зависимость фототока от обратного смещения имеет вид ступенек, что обусловлено расширением области объемного заряда и последовательным прохождением ее границы через квантовые ямы.
3. Эффект отрицательной дифференциальной фотопроводимости в структурах InGaN/GaN с МКЯ обусловлен сдвигом края собственного поглощения материала квантовых ям вследствие компенсации внутреннего пьезоэлектрического поля полем p-n-перехода.
4. Исследование зависимости фототока от обратного смещения в гетероструктурах InGaN/GaN с МКЯ позволяет определить расстояние между квантовыми ямами, а также оценить качество гетероинтерфейсов.

Результаты работы были использованы при выполнении проектов № 2.1.1/2503 и 2.1.1/10269 «Развитие теории полупроводниковых наноструктур и разработка новых методов их диагностики» аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 г.)»; гос. контрактов № 8943р/14023 от 19.04.2011 и № 10482р/16907 от 08.06.2012 на выполнение НИОКР «Разработка автоматизированной установки для неразрушающего контроля качества полупроводниковых наногетероструктур» по программе «У.М.Н.И.К.» Фонда содействию развития малых форм предприятий в научно-технической сфере.

Апробация результатов работы. Полученные в работе результаты докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 11-14 Всероссийских молодежных конференциях по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, СПб, 2009-2012 гг.; Российской молодежной конференции по физике и астрономии «Физика.СПб», СПб, 2012 г.; 12-й научной молодежной школе по твердотельной электронике «Физика и технология микро- и наносистем», СПб, 2009 г.; 62-66 научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ, СПб, 2009-2013.

Публикации: основные результаты исследований, изложенных в диссертации, опубликованы в 15 работах, среди которых 3 публикации в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в перечне ВАК, 1 патент на полезную модель, 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, 1 публикация в

журнале, не входящем в перечень ВАК, 7 публикаций в трудах научно-технических конференций (в т.ч. 5 всероссийских).

Структура диссертации: Диссертация состоит из введения, четырех глав (в сумме 12 параграфов) и заключения. Она изложена на 146 страницах машинописного текста, включает 71 рисунок, 2 таблицы, список литературы из 91 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении излагается актуальность темы диссертации, определяется основная цель работы и ее задачи, представлены основные результаты работы, обладающие научной новизной, а также имеющие практическую значимость, перечислены научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава представляет собой обзор литературы, который посвящен свойствам нитрида галлия и гетероструктур на его основе, а также известным на сегодняшний день неразрушающим методам диагностики полупроводниковых квантово-размерных структур.

В первом параграфе (п. 1.1) кратко описываются основные свойства нитридов галлия, индия и алюминия. Рассматриваются их кристаллическая структура, структура энергетических зон, электрофизические свойства. Часть параграфа посвящена технологическим особенностям создания эпитаксиальных слоев полупроводниковых нитридов, их твердых растворов, и гетероструктур на их основе. Описывается влияние механических напряжений и связанных с ними пьезоэлектрических полей на энергетический спектр носителей заряда в квантовых ямах InGaN/GaN.

Во втором параграфе (п. 1.2) приводится обзор адмиттансных методов исследования полупроводниковых гетероструктур. К ним относятся методы вольт-фарадного профилирования, спектроскопии адмиттанса, релаксационной спектроскопии глубоких уровней. Рассматриваются физические явления, лежащие в основе данных методов. Анализируются свойства барьерной емкости p-n-перехода и барьера Шоттки, в том числе при наличии глубоких уровней. Описывается применение адмиттансных методов для анализа структур с квантовыми ямами, точками, сверхрешетками, а также способы определения энергетического спектра носителей заряда по экспериментальным данным.

В третьем параграфе (п. 1.3) рассматриваются оптические и фотоэлектрические методы исследования гетероструктур, связанные с анализом спектров люминесценции, отражения, фототока и фотоэдс. Описываются физические основы данных методов, их возможности и ограничения. Приводятся примеры использо-

вания данных методик для анализа энергетического спектра носителей заряда в квантово-размерных структурах, а также для определения пьезоэлектрических полей в квантовых ямах InGaN/GaN.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных установок, методик исследований, а также характеристик исследуемых образцов.

В первом параграфе (п. 2.1) излагается методика измерения дифференциального адмиттанса полупроводниковых гетероструктур и описывается разработанная измерительная установка. Установка состоит из криостата, измерителя иммитанса, источника напряжения и компьютера. Исследуемый образец помещается в камеру криостата, который позволяет изменять его температуру в пределах от 8 до 400 К. На образец подается постоянное смещение и переменный измерительный сигнал с малой амплитудой. При увеличении смещения область объемного заряда расширяется, что позволяет сканировать структуру по глубине. Измерительный сигнал создает переменный ток, по реактивной и активной составляющим которого определяются дифференциальные емкость и проводимость. Программное обеспечение, разработанное в среде LabVIEW, позволяет автоматизировать измерительный процесс. С его помощью осуществляется сохранение, обработка данных и расчет наблюдаемого профиля концентрации носителей заряда по вольт-фарадным характеристикам исследуемых образцов.

Во втором параграфе (п. 2.2) представлена методика исследования фотоэлектрических характеристик гетероструктур InGaN/GaN с МКЯ. Она заключается в возбуждении структуры светом, энергия фотонов которого превышает ширину запрещенной зоны материала квантовых ям, но не превышает ширину запрещенной зоны материала барьерных слоев. В качестве источников света использовались зеленый, синий и фиолетовый светодиоды. При таком возбуждении во всех квантовых ямах локально генерируются избыточные носители заряда. Однако в стационарном режиме вклад в сквозной фототок дают носители заряда, генерируемые только в квантовых ямах, находящихся внутри обедненной области p-n-перехода. Поэтому в зависимости фототока от обратного смещения наблюдаются ступени, связанные с переходом квантовых ям из области квазинейтральности в область объемного заряда. Для измерения спектральных характеристик фототока была разработана установка, в которой излучение от мощного синего светодиода пропускается через монохроматор и механический модулятор, а фототок измерялся синхронным детектором.

В третьем параграфе (п. 2.3) представлены характеристики образцов, на которых проводились экспериментальные исследования. В качестве образцов использовались светодиоды на основе гетероструктур InGaN/GaN, излучающие в сине-зеленой области спектра. Структуры были выращены на сапфировых под-

ложках методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. Их активная область состояла из квантовых ям InGaN, разделенных барьерами GaN. Квантовые ямы располагались вблизи металлургической границы p-n-перехода, что обеспечивало их заполнение инжектируемыми носителями заряда при прямом смещении. Излучение, возникающее при межзонной рекомбинации в области квантовых ямах, выводилось наружу через верхний p-слой.

Третья глава посвящена исследованиям адмиттанса гетероструктур InGaN/GaN с МКЯ. Анализируются вольт-фарадные характеристики и зависимости дифференциальной проводимости от обратного напряжения. Рассчитываются наблюдаемые концентрационные профили носителей заряда в образцах. Развиваются статическая и динамическая теории адмиттанса гетероструктур с квантовыми ямами, основанные на самосогласованном решении уравнений Шредингера и Пуассона и кинетических уравнениях.

Первый параграф (п. 3.1) посвящен экспериментальным исследованиям адмиттанса гетероструктур InGaN/GaN. На рисунках 1 и 2 представлены зависимости дифференциальных емкости и проводимости светодиодной структуры InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами от обратного напряжения.

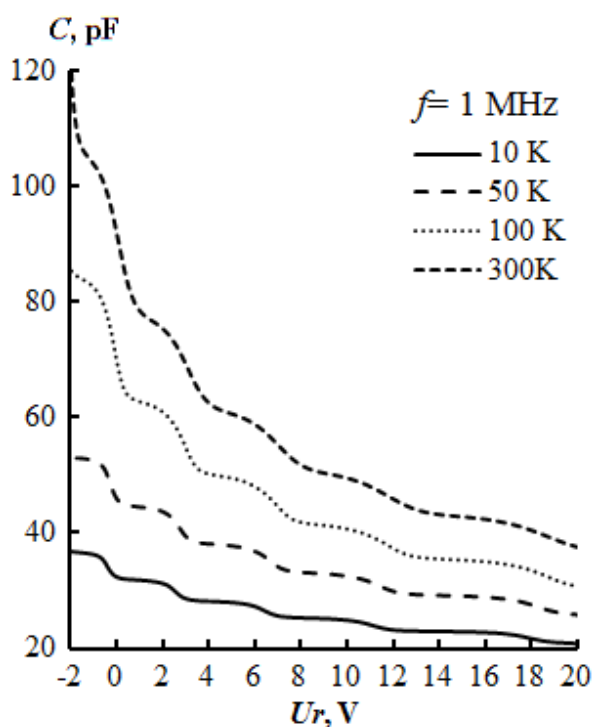


Рисунок 1 – Зависимости емкости структуры InGaN/GaN с МКЯ от обратного напряжения

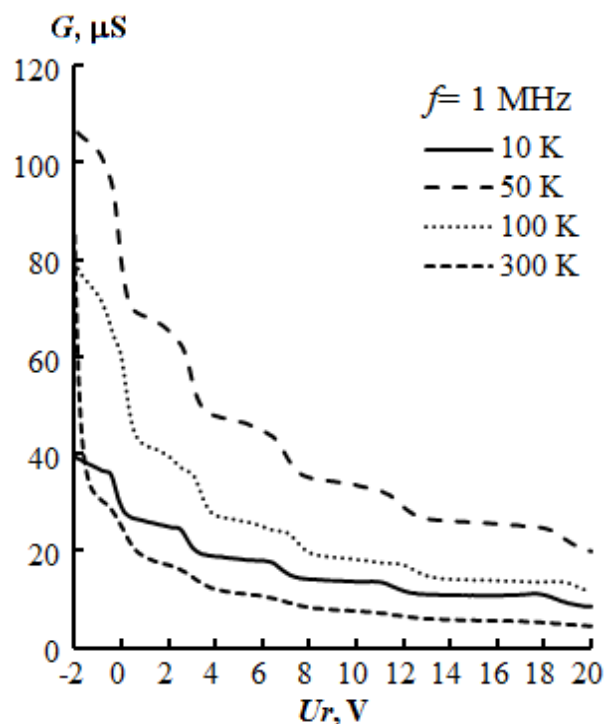


Рисунок 2 – Зависимости проводимости структуры InGaN/GaN с МКЯ от обратного напряжения

На вольт-фарадных характеристиках отчетливо наблюдаются пологие участки, связанные с последовательным прохождением границы области объем-

ного заряда p-n-перехода через квантовые ямы. На зависимости дифференциальной проводимости от обратного смещения наблюдаются аналогичные особенности. Отметим, что свойства барьерной емкости хорошо изучены, однако до настоящего момента не существовало теории, позволяющей описать наблюдаемые особенности в зависимости проводимости от обратного смещения.

На рисунке 3 представлен рассчитанный из вольт-фарадных характеристик наблюдаемый концентрационный профиль электронов в структуре InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами. На нем отчетливо прослеживаются пять пиков, которые соответствуют электронам, локализованным в пяти квантовых ямах. Расстояние между пиками составляет 20 нм, что соответствует периоду следования квантовых ям в гетероструктуре.

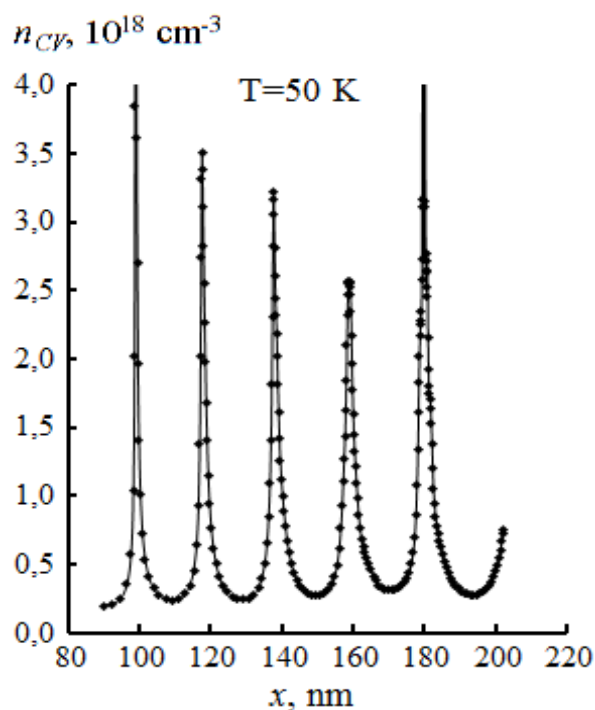


Рисунок 3 – Наблюдаемый профиль концентрации электронов в структуре InGaN/GaN с МКЯ

Острота пиков свидетельствует о высокой степени локализации носителей заряда в квантовых ямах, что указывает на высокое качество данной структуры.

Во втором параграфе (п. 3.2) излагается статическая теория барьерной емкости структур с квантовыми ямами. Локализованные в квантовой яме носители заряда создают потенциал, влияющий как на их энергетический спектр, так и на их пространственное распределение. Такой потенциал можно определить посредством самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона. Рассматривался полупроводник n-типа проводимости с барьером Шоттки и квантовой ямой. Были рассчитаны пространственное распределение

потенциала, концентрации ионизованных доноров и свободных электронов при различных обратных напряжениях. Барьерная емкость рассчитывалась как отношение изменения полного объемного заряда к изменению обратного напряжения. Отмечается, что подобный расчет в рамках статической теории должен давать значение емкости, измеряемой на частоте, стремящейся к нулю. В реальном же эксперименте емкость измеряется на ненулевой частоте, что требует разработки динамической теории адмиттанса.

В третьем параграфе (п.3.3) излагается динамическая теория адмиттанса, позволяющая учесть эффекты запаздывания отклика системы по отношению к

внешнему воздействию. В рамках данной теории динамика системы описывается уравнениями Пуассона, непрерывности и баланса:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \varphi(x,t)}{\partial x^2} = -\frac{|e|}{\varepsilon \varepsilon_0} [N_D^+(x,t) - n(x,t)] \\ \frac{\partial N_D^+(x,t)}{\partial t} - \frac{\partial n(x,t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left[D_e \frac{\partial n(x,t)}{\partial x} - \mu_e n(x,t) \frac{\partial \varphi(x,t)}{\partial x} \right] \\ \frac{\partial N_D^+(x,t)}{\partial t} = \xi N_D^0(x,t) - \gamma n(x,t) N_D^+(x,t) \end{cases}$$

Здесь D_e - коэффициент диффузии электронов, μ_e - подвижность электронов, ξ - коэффициент генерации пар электрон – ионизованный донор, γ - коэффициент рекомбинации электронов с ионизованными донорами. Система уравнений решалась с граничными условиями, соответствующими внешнему обратному напряжению, заданному в следующем виде:

$$U(t) = U_0 + \Delta U e^{i\omega t},$$

где U_0 - постоянное обратное смещение, ΔU - амплитуда переменного гармонического сигнала ($\Delta U \ll U_0$), ω - его круговая частота. Решение для потенциала $\varphi(x,t)$, концентраций электронов $n(x,t)$ и ионизованных доноров $N_D^+(x,t)$ искалось в виде:

$$\begin{cases} \varphi(x,t) = \varphi_0(x) + \Delta \varphi(x) e^{i\omega t} \\ n(x,t) = n_0(x) + \Delta n(x) e^{i\omega t} \\ N_D^+(x,t) = N_{D0}^+(x) + \Delta N_D^+(x) e^{i\omega t} \end{cases},$$

где $\varphi_0(x)$, $n_0(x)$ и $N_{D0}^+(x)$ - соответствующие величины при постоянном смещении U_0 . Они являются решением статической самосогласованной задачи, рассмотренной выше. $\Delta \varphi(x)$, $\Delta n(x)$, $\Delta N_D^+(x)$ - комплексные амплитуды, отражающие соответственно изменение потенциала, концентрации электронов и ионизованных доноров под действием переменного напряжения с амплитудой ΔU (все эти величины пропорциональны ΔU ; $|\Delta \varphi| \ll |\varphi_0|$, $|\Delta n| \ll n_0$, $|\Delta N_D^+| \ll N_{D0}^+$). В малосигнальном приближении комплексные амплитуды определялись из решения системы линейных уравнений. Дифференциальная емкость C и проводимость G рассчитывались по следующим формулам:

$$C = \frac{|e|S}{\Delta U} \int_0^L \operatorname{Re} [\Delta N_D^+(x) - \Delta n(x)] dx$$

$$G = -\omega \frac{|e|S}{\Delta U} \int_0^L \operatorname{Im} [\Delta N_D^+(x) - \Delta n(x)] dx$$

где S - площадь барьера Шоттки, L - длина структуры. Теоретические зависимости емкости и проводимости от напряжения представлены на рисунках 4 и 5.

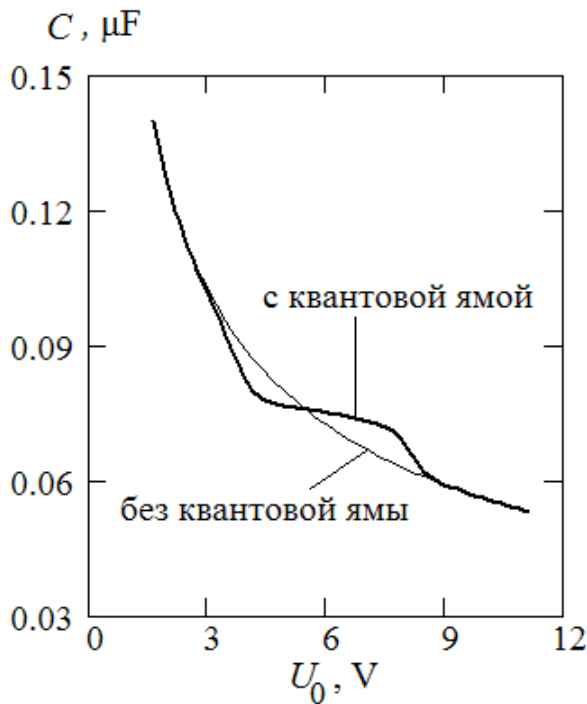


Рисунок 4 – Теоретическая зависимость емкости барьера Шоттки от обратного смещения

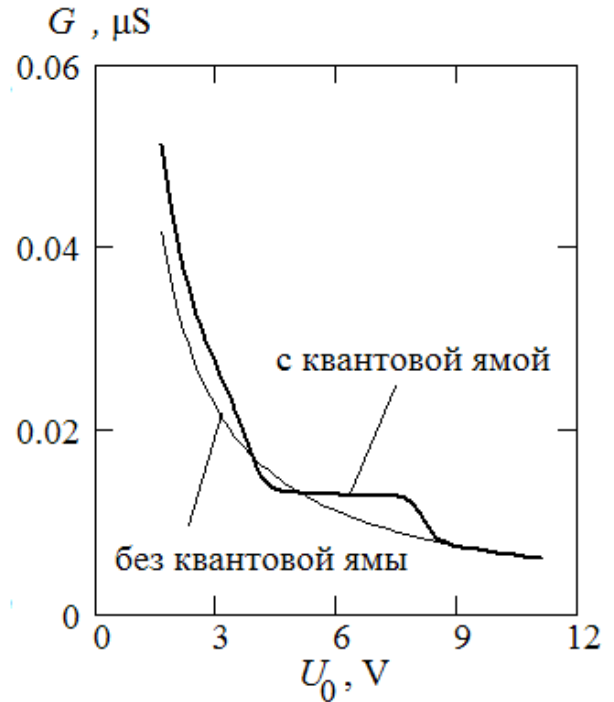


Рисунок 5 – Теоретическая зависимость проводимости барьера Шоттки от обратного смещения

Согласно развитой теории, ступенчатый характер зависимости проводимости от напряжения (рисунок 5) обусловлен соответствующей особенностью барьерной емкости (рисунок 4). Анализ теоретических данных показывает, что квантовая яма всегда дает вклад в проводимость, пока в ней есть носители заряда, даже если граница области объемного заряда находится достаточно далеко от нее.

Четвертая глава посвящена исследованию фотоэлектрических характеристик гетероструктур InGaN/GaN с МКЯ. Анализируются экспериментальные зависимости фототока от обратного смещения, объясняются наблюдаемые особенности, развивается теория фототока в структурах с квантовыми ямами. Предлагается новый метод анализа структур с квантовыми ямами по фотоэлектрическим характеристикам.

Первый параграф (п. 4.1) посвящен экспериментальным исследованиям фототока в структурах InGaN/GaN. Измерения фототока и его зависимости от обратного напряжения проводились в области температур от 10 до 300 К, в диапазоне длин волн от 400 до 520 нм. На рисунке 6 представлены фотоэлектрические характеристики светодиодной структуры, полученные при возбуждении светом с длиной волны $\lambda = 415$ нм и $\lambda = 465$ нм. Как следует из рисунка, наблюдаются ярко выраженные ступеньки в фототоке, которые обусловлены последовательным прохождением границы области объемного заряда р-п-перехода через квантовые ямы. Заметим, что на характеристике, полученной при возбуждении светом с $\lambda = 465$, наблюдаются также участки отрицательной дифференциальной проводимости. Ключевым условием для их наблюдения являлось то, что возбуждение осуществлялось вблизи края собственного поглощения материала квантовых ям. Данные особенности обусловлены сдвигом края собственного поглощения в сторону больших энергий вследствие компенсации внутреннего пьезоэлектрического поля квантовых ям полем р-п-перехода. Когда квантовая яма находится в области электронейтральности (рисунок 7), в ней существует сильное внутреннее пьезоэлектрическое поле. За счет квантово-размерного эффекта Штарка энергетический зазор между основными состояниями электрона и дырки в такой системе существенно меньше, чем в отсутствие пьезополя. Когда поле р-п-перехода частично компенсирует пьезоэлектрическое поле в квантовой яме (рисунок 8), энергетический зазор между состояниями электрона и дырки увеличивается. При этом количество поглощаемых фотонов с энергией, близкой к пороговой, существенно уменьшается, что проиллюстрировано на вставках к рисункам 7 и 8.

Во втором параграфе (п. 4.2) развивается теория фототока в барьерных структурах с квантовыми ямами. За основу взято решение самосогласованной статической задачи для барьера Шоттки с квантовой ямой, представленное в параграфе 3.2. Дополнительно в задачу включается оптическое возбуждение в области квантовых ям, которое считается слабым. В рамках решения уравнений Пуассона, непрерывности и баланса находятся изменения потенциала, концентраций

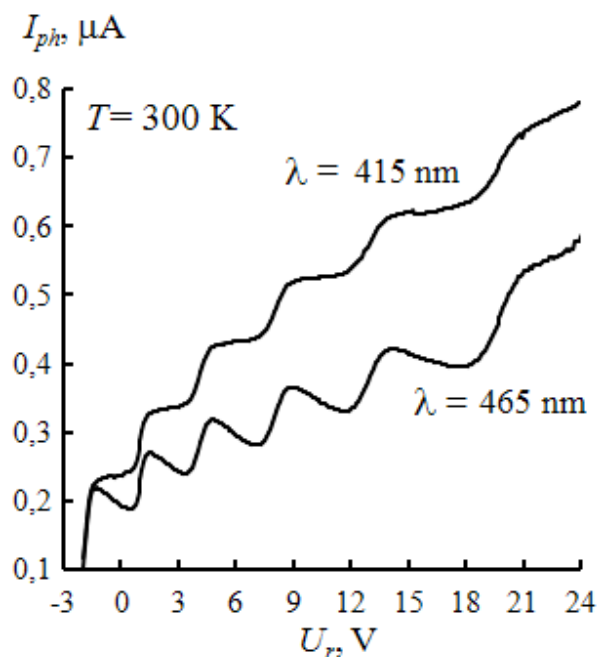


Рисунок 6 – Зависимости фототока от обратного напряжения в структурах InGaN/GaN с МКЯ

электронов и дырок, а также ионизованных доноров, вызванные оптическим возбуждением. После этого рассчитывается сквозной фототок через структуру при различных смещениях. Полученная расчетная зависимость фототока от напряжения хорошо согласуется с экспериментальными данными.

В третьем параграфе (п. 4.3) предлагается новый фотоэлектрический метод диагностики структур InGaN/GaN с МКЯ. Для его реализации было разработано специальное устройство, позволяющее проводить экспресс-диагностику светодиодных структур. Время измерений одного образца составляет порядка 0,5 секунд. Разработанный прибор позволяет определять количество квантовых ям в гетероструктуре, расстояние между ними и качество гетероинтерфейсов. Точность определения расстояния между ямами для структуры с концентрацией легирующей примеси $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ составляет $\sim 1 \text{ нм}$. Данная методика может быть использована на этапе оптимизации технологических процессов создания InGaN/GaN гетероструктур с множественными квантовыми ямами.

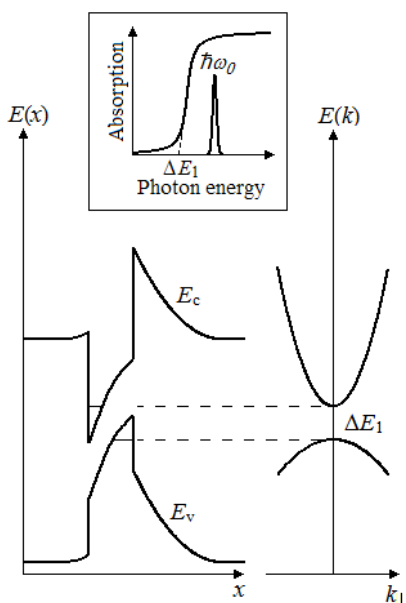


Рисунок 7 – Квантовая яма InGaN/GaN в нейтральной области

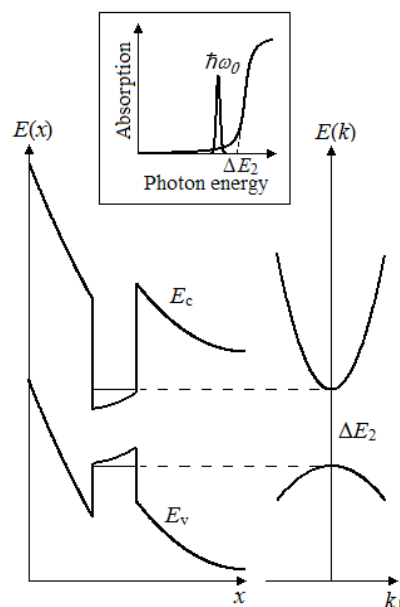


Рисунок 8 – Квантовая яма InGaN/GaN в обедненной области

В Заключение к диссертации сформулированы выводы, перечислены основные достижения и полученные результаты:

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана автоматизированная установка для исследования адмиттанса и фотоэлектрических характеристик полупроводниковых наногетероструктур в широком диапазоне температур и частот. В среде LabVIEW разработано программное обеспечение для автоматизации процесса измерений, обработки

экспериментальных данных, расчета концентрационных профилей носителей заряда.

2. Исследованы дифференциальные емкость и проводимость гетероструктур InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами в диапазоне частот от 1 кГц до 1 МГц, в области температур от 10 до 300 К. На вольт-фарадных характеристиках наблюдались ярко выраженные плато, обусловленные последовательным опустошением квантовых ям при расширении области объемного заряда p-n-перехода.
3. Проанализированы профили концентрации носителей заряда в гетероструктурах InGaN/GaN, рассчитанные по вольт-фарадным характеристикам. Показано, что ярко выраженные концентрационные пики соответствуют электронам, локализованным в квантовых ямах InGaN. Определены расстояния между ямами, оценено качество гетероинтерфейсов.
4. На основе самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона развита статическая и динамическая теория адмиттанса барьера Шоттки, содержащего квантовые ямы. В рамках динамической теории впервые рассчитана зависимость дифференциальной проводимости структур с квантовыми ямами от обратного напряжения.
5. Показано, что экспериментально наблюдаемые ступеньки в зависимости дифференциальной проводимости структур с квантовыми ямами от обратного смещения обусловлены соответствующими особенностями барьерной емкости.
6. Исследованы зависимости фототока от обратного напряжения в структурах InGaN/GaN с МКЯ в диапазоне длин волн от 400 до 520 нм в области температур от 10 до 300 К. Обнаружено, что данная зависимость имеет ступенчатый характер, что обусловлено последовательным прохождением границы области объемного заряда через квантовые ямы.
7. Впервые обнаружено, что в структурах InGaN/GaN с квантовыми ямами при оптическом возбуждении вблизи края собственного поглощения материала квантовых ям наблюдается эффект отрицательной дифференциальной проводимости. Показано, что данное явление обусловлено сдвигом края собственного поглощения вследствие компенсации внутреннего пьезоэлектрического поля квантовых ям полем p-n-перехода.
8. Показано, что ступеньки в зависимости фототока от обратного смещения наиболее ярко выражены при комнатной температуре. В области низких температур данные особенности размываются. Это связано со снижением вероятности теплового выброса из квантовых ям носителей заряда, генерируемых светом.

9. Развита теория фототока в полупроводниковых барьерных структурах с квантовыми ямами. Результаты расчетов, выполненных в рамках данной теории, хорошо согласуются с экспериментальными данными.
10. Предложен новый неразрушающий экспресс-метод диагностики гетероструктур InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами, основанный на анализе их фотоэлектрических характеристик.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Барановский М.В. Автоматизированная установка для исследования адмиттанса полупроводниковых наногетероструктур [Текст] / Барановский М.В., Глинский Г.Ф. // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2012. – № 4. – С. 3-7.
2. Барановский М.В. Фотоэлектрический метод диагностики гетероструктур InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами [Текст] / Барановский М.В., Глинский Г.Ф., Миронова М.С. // Физика и техника полупроводников. – 2013. – Т. 47. – Вып. 1. – С. 60-64.
3. Барановский М.В. Экспресс-диагностика светодиодов на основе гетероструктур InGaN/GaN фотоэлектрическим методом [Текст] / Барановский М.В., Глинский Г.Ф. // Письма в журнал технической физики. – 2013. – Т. 39. – Вып. 10. – С. 22-28.

Статьи в других изданиях

4. Барановский М.В. Диагностика InGaN/GaN наноструктур с множественными квантовыми ямами [Текст] / Барановский М.В., Глинский Г.Ф. // Петербургский журнал электроники. – 2012. – № 2(71). – С. 27-40.

Патенты и свидетельства

5. Устройство контроля качества полупроводниковых квантово-размерных структур [Текст]: пат. 117714 Рос. Федерация: МПК⁸ H01L21/66, G01N 27/00, 21/00 / Глинский Г.Ф., Барановский М.В.; заявитель и патентообладатель СПбГЭТУ. – № 2011150325/28; заявл. 09.12.2011; опубл. 27.06.2012. - 8 с.: ил.
6. Расчет профиля концентрации носителей заряда в полупроводниковых наноструктурах [Текст]: Свид-во о регистрации программы для ЭВМ. Рос. Федерация / Барановский М.В., Глинский Г.Ф.; заявитель и правообладатель СПбГЭТУ. - № 2011617125; выд. 13.09.2011.
7. Экспресс-диагностика светодиодных структур [Текст]: Свид-во о регистрации программы для ЭВМ. Рос. Федерация / Барановский М.В., Глинский Г.Ф.; заявитель и правообладатель СПбГЭТУ. - № 2011617126; выд. 13.09.2011.

8. Комплексная диагностика полупроводниковых наноструктур [Текст]: Свид-во о регистрации программы для ЭВМ. Рос. Федерация / Барановский М.В., Глинский Г.Ф.; заявитель и правообладатель СПбГЭТУ. - № 2011617779; выд. 06.10.2011.

Материалы конференций

9. Барановский М.В. Исследование полупроводниковых гетероструктур методом вольт-фарадного профилирования [Текст] / Барановский М. В., Глинский Г. Ф. // 12-я научная молодежная школа «Физика и технология микро- и наносистем», г. Санкт-Петербург, 10 – 11 октября 2009 г. – 2009. – С. 28.
10. Барановский М.В. Исследование вольт-фарадных характеристик полупроводниковых гетероструктур и разработка автоматизированной установки для неразрушающего контроля их качества [Текст] / Барановский М. В., Глинский Г. Ф. // 11-я всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, г. Санкт-Петербург, 30 ноября - 4 декабря 2009 г. – 2009. – С. 74.
11. Барановский М.В. Автоматизированная установка для неразрушающего контроля качества полупроводниковых наногетероструктур [Текст] / Барановский М. В., Глинский Г. Ф. // 12-я всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, г. Санкт-Петербург, 25-29 октября 2010 г. – 2010. – С. 105.
12. Барановский М.В. Исследование фотоэлектрических свойств полупроводниковых наногетероструктур InGaN/GaN [Текст] / Барановский М. В., Глинский Г. Ф. // 13-я всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, г. Санкт-Петербург, 21-25 ноября 2011 г. – 2011. – С. 34.
13. Барановский М.В. Исследование фотоэлектрических явлений в наногетероструктурах InGaN/GaN [Текст] / Барановский М. В., Глинский Г. Ф. // 65-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ»: Сборник докладов студентов, аспирантов и молодых ученых. Санкт-Петербург, 24 января – 4 февраля 2012 г. – 2012. – С. 47-52.
14. Барановский М.В. Фотопроводимость InGaN/GaN гетероструктур с множественными квантовыми ямами [Текст]// Барановский М. В., Глинский Г. Ф. // Российская молодежная конференция по физике и астрономии «Физика А.СПб», г. Санкт-Петербург, 23-24 октября 2012 г. –2012. – С. 146.
15. Барановский М.В. Диагностика гетероструктур InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами фотоэлектрическим методом [Текст] / Барановский М. В., Глинский Г. Ф. // 14-я всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, г. Санкт-Петербург, 26-30 ноября 2012 г. –2012. – С. 52.