

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Асланян Артём Эдуардович

**МОДУЛЯЦИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ СВЕТОДИОДНЫХ
ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ InGaN/GaN**

специальность 01.04.05 – оптика

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2019

Работа выполнена на кафедре общей физики физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Научный руководитель: **Авакянц Лев Павлович,**
доктор физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Горелик Владимир Семёнович,**
доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник, заведующий лабораторией
«Комбинационное рассеяние света» отделения оптики
Физического института имени П.Н. Лебедева РАН
Снигирёв Олег Васильевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой физики полупроводников и
криоэлектроники физического факультета Московского
государственного университета имени М.В. Ломоносова
Образцова Елена Дмитриевна,
кандидат физико-математических наук, доцент,
заведующая лабораторией спектроскопии наноматериалов
отдела фотоиндуцированных поверхностных явлений Центра
естественно-научных исследований Института общей физики
имени А.М. Прохорова РАН

Защита диссертации состоится «__» _____ 2019 года в ____ ч. ____ мин.
на заседании диссертационного совета МГУ.01.08 на физическом факультете Московского
государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва,
ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций Научной библиотеки Мос-
ковского государственного университета имени М.В. Ломоносова (адрес: 119192, г. Москва,
Ломоносовский пр-т, д. 27) и в сети Интернет: <https://istina.msu.ru/dissertations/191286709/>

Автореферат разослан «__» _____ 2019 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета МГУ.01.08,
доктор физико-математических наук, доцент
E-mail: kosareva@physics.msu.ru

О.Г. Косарева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Полупроводниковые структуры на основе нитрида галлия (GaN) и его соединений широко применяются в современной полупроводниковой электронике. Основным достоинством этого прямозонного полупроводника из группы $A^{III}B^V$ является большая ширина запрещенной зоны ($E_g^{GaN} = 3,4$ эВ [1]), которую можно варьировать в твёрдых тройных растворах $In_xGa_{1-x}N$, изменяя концентрацию индия x (ширина запрещённой зоны InN $E_g^{InN} = 0,8$ эВ [1]). Квантово-размерные структуры, выращенные на основе таких соединений, применяют для изготовления устройств, работающих в ультрафиолетовом, синем и зелёном диапазонах оптического спектра. Квантовые ямы (КЯ), состоящие из слоёв GaN/InGaN/GaN, являются основным элементом в сверхъярких светодиодах (СД), ультрафиолетовых детекторах и лазерных диодах [2–5]. Благодаря большой ширине запрещённой зоны GaN, свойства таких оптоэлектронных приборов стабильны при высоких температурах [6,7].

Излучающие устройства в красном, жёлтом и частично зелёном диапазонах видимого спектра можно изготовить на основе соединений AlGaAs и InGaAlP. Однако эффективные СД в синей и ультрафиолетовой области оптического спектра изготавливают только на основе соединений InGaN/GaN [8, гл. 12]. В 2014 году Нобелевская премия по физике была присуждена Х. Амано, И. Акасаки и С. Накамура за ряд работ по разработке именно таких СД кристаллов [9–14]. За сравнительно короткий промежуток времени эти светодиоды стали основой энергоэффективного освещения.

Одним из факторов, влияющих на эффективность излучения СД, являются механические напряжения в слоях GaN и его соединений гексагональной сингонии, выращенных на полярных (0001) и полуполярных плоскостях. Такие напряжения приводят к появлению сильных пьезоэлектрических полей с напряжённостями электрического поля порядка единиц МВ/см, модифицирующих зонную структуру [15]. В результате носители зарядов – электроны и дырки – оказываются разделёнными в реальном пространстве. Это приводит к уменьшению интеграла перекрытия волновых функций носителей в валентной зоне и зоне проводимости в КЯ, снижению вероятности излучательной рекомбинации в области КЯ и уменьшению квантового выхода СД. Таким образом, исследования электрооптических свойств и внутренних электрических полей в активной области светодиодных гетероструктур с целью увеличения эффективности устройств на основе InGaN/GaN являются актуальными [16].

Ранее оценка пьезоэлектрических полей в множественных КЯ СД образцов GaN/InGaN проводилась методами фотолюминесценции и рентгеноструктурного анализа [17], а также электропоглощения [18] и фототока [19]. В работе [20] проведено сравнение напряжённости пьезоэлектрических полей СД гетероструктур на основе InGaN, выращенных на кремниевой и на сапфировой подложках методами фотолюминесценции, электролюминесценции и электроотражения. Сравнение средней напряжённости электрического поля, рассчитанного разными методами, проведено в работе [21] для СД структуры из трёх КЯ GaN/InGaN. В качестве одного из возможных факторов, затрудняющих определение этой величины, указана неоднородность электрического поля, которая может проявиться при рассмотрении структур с большим количеством КЯ.

Поскольку электрические свойства полупроводников тесно связаны с оптическими, то для неразрушающей диагностики таких полупроводниковых структур могут быть использованы оптические методы, такие как электро- и фотолюминесценция, спектроскопия отражения и поглощения. Однако решение важнейшей задачи по определению энергий межзонных переходов в гетероструктуре с помощью перечисленных методов оказывается затруднительным. Это связано с наложением спектральных особенностей, обусловленных переходами различного типа, на широкий бесструктурный фон, причиной которого является электрон-фононное взаимодействие, а также рассеяние на дефектах и неконтролируемых примесях. В результате этого приходится проводить измерения с кристаллами высокой чистоты и при низких температурах [22, п. 7].

Использование модуляционных методик позволяет регистрировать производные оптических спектров разного порядка, тем самым выделяя особенности в спектрах, связанные с переходами в критических точках. При этом влияние уширения спектральных линий и наличие фона сказываются слабее, что позволяет проводить исследования при комнатной температуре. Наиболее распространенным является метод спектроскопии электроотражения (ЭО), поскольку он не требует специальной подготовки поверхности образца. Благодаря наличию р-п-перехода в СД структурах, внешнее электрическое поле прикладывается локально с помощью контактов к р- и п- слоям. Из-за малых размеров активной области, порядка 50-100 нм, достаточно приложить напряжение 10-20 В, чтобы иметь возможность изменять напряжённость внутреннего электрического поля как по величине, так и по направлению. Несмотря на указанные преимущества, в сложных гетероструктурах с несколькими межзонными переходами, близкими по энергии, существует проблема интерпретации полученных спектров.

Метод спектроскопии электропропускания (ЭП) использовался крайне редко для структур на основе InGaN/GaN. Это может быть связано, прежде всего, с необходимостью

подготовки поверхности образцов высокого оптического качества. Кроме того, в спектрах ЭП наблюдаются особенности, связанные с поглощением на донорно-акцепторных примесях, затрудняющие исследование энергетических уровней в активной области. Дополнительным источником информации о таких процессах могут служить спектры фототока (ФТ), поскольку обе методики – ЭП и ФТ – связаны с мнимой частью диэлектрической функции [22].

Таким образом, детальные исследования гетероструктур на основе InGaN/GaN методами ЭО, ЭП и ФТ представляют интерес, как для фундаментальной, так и для прикладной науки. Выбор образцов-прототипов СД обусловлен тем, что их гетероструктура стала классической с точки зрения технологии изготовления, и рассматриваемые в работе СД можно считать модельными объектами, позволяющими исследовать оптические и электрические свойства слоёв InGaN/GaN в активной области.

Цель диссертационной работы – исследовать распределение внутренних электрических полей и электрооптические свойства в активной области светодиодных гетероструктур на основе InGaN/GaN в зависимости от числа квантовых ям и концентрации индия методами модуляционной спектроскопии.

Для достижения этой цели в настоящей работе были поставлены следующие **задачи**:

1. Разработать методику одновременной регистрации спектров электроотражения и электропропускания.
2. Разработать методику анализа зонной структуры активной области светодиодной многослойной системы на основе InGaN/GaN на базе комплекса модуляционных методов электроотражения, электропропускания и фототока.
3. Исследовать особенности, связанные с интерференционными эффектами в спектрах электроотражения светодиодных гетероструктур с квантовыми ямами InGaN/GaN в активной области.
4. Исследовать модуляционными методами пьезоэлектрические поля в светодиодных гетероструктурах с разной длиной волны свечения и разным количеством квантовых ям InGaN/GaN в активной области.
5. Исследовать процессы, связанные с поглощением излучения видимого диапазона в светодиодных гетероструктурах с разным количеством КЯ InGaN/GaN в активной области, методами фототока и электропропускания.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Наблюдаемая в спектрах электроотражения светодиодных гетероструктур InGaN/GaN смена фазы интерферирующих волн при изменении смещения p-n-перехода

обусловлена сменой знака разности показателей преломления слоёв InGaN и GaN вследствие электрооптического эффекта.

2. Предложенный метод модификации спектров ЭО с помощью соотношений Крамерса-Кронига позволяет оценить неоднородность напряжённости электрического поля в квантовых ямах активной области светодиодных гетероструктур InGaN/GaN. Этим методом установлено увеличение напряженности электрического поля в квантовых ямах по толщине активной области с ростом концентрации индия в слоях $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$.

3. Средняя напряжённость электрического поля в квантовых ямах активной области светодиодной гетероструктуры снижается в 1,6 раза с ростом количества квантовых ям от одной до пяти.

4. Метод спектроскопии фототока позволяет определять обусловленные размытием гетерограниц $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ изменения концентрации индия в активной области светодиодной гетероструктуры.

5. При поглощении излучения с длиной волны в диапазоне 350-500 нм в гетероструктурах на основе квантовых ям InGaN/GaN наблюдается фотореверсивный эффект: при определённых смещениях р-п-перехода направление фототока зависит от длины волны излучения.

6. Энергии межзонных переходов в активной области светодиодных гетероструктур с квантовыми ямами InGaN/GaN могут быть определены по минимумам в спектрах электропропускания и экстремумам в спектрах производной фототока.

Научная и практическая значимость

Результаты исследования методом ЭО показали, что в СД гетероструктурах с множественными КЯ InGaN/GaN наблюдается неоднородность электрических полей в активной области. При этом методом ЭП обнаружено, что с ростом количества квантовых ям в активной области уменьшается напряжённость электрического поля, что приводит к увеличению эффективности свечения светодиодной гетероструктуры. Таким образом, полученная информация может способствовать повышению эффективности СД, благодаря уменьшению пьезоэлектрических полей в целом в активной области с ростом количества КЯ или за счёт снижения напряжённостей электрического поля в отдельных, наиболее активных квантовых ямах.

Обнаруженный фотореверсивный эффект смены направления фототока из-за смены длины волны возбуждения может быть использован в основе разработок оптоэлектронных приборов, например, оптических триггеров.

Сравнительный анализ методик ЭО, ЭП и ФТ показал, что энергия основного перехода в активной области светодиодной гетероструктуры InGaN/GaN, а также энергии

переходов между барьерами разного типа, могут быть получены с помощью более простого в реализации метода ФТ. Этот же метод может быть использован для диагностики размытия гетерограниц.

Научная новизна

1. Впервые методом электроотражения обнаружена смена фазы интерферирующих волн в слоях светодиодной гетероструктуры с квантовыми ямами InGaN/GaN.

2. Впервые методом электроотражения приведена оценка напряжённостей электрических полей в отдельных квантовых ямах InGaN/GaN активной области светодиодных гетероструктур разной длины волны свечения.

3. Впервые получены спектры электропропускания для светодиодных гетероструктур InGaN/GaN с различным количеством квантовых ям и дана интерпретация наблюдаемых спектральных особенностей.

4. Впервые обнаружен и объяснён фотореверсивный эффект в светодиодных гетероструктурах на основе квантовых ям InGaN/GaN.

5. Впервые предложена методика оценки размытия гетерограниц InGaN/GaN в квантовых ямах активной области светодиодной гетероструктуры на основе анализа спектров фототока.

6. Впервые установлено, что энергии межзонных переходов в активной области светодиодных гетероструктур с квантовыми ямами InGaN/GaN могут быть определены по минимумам в спектрах электропропускания и экстремумам в спектрах производной фототока.

Апробация результатов

Результаты работы доложены на следующих научных конференциях: International Workshop on Nitride Semiconductors IWN2012 (Саппоро, Япония, 2012), 15-я Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 2013), 9-я Всероссийская конференция Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы (Москва, 2013), International Workshop on Nitride Semiconductors IWN2014 (Вроцлав, Польша, 2014), 32 International Conference on Physics of Semiconductors (Аустин, Техас, США, 2014), 10-я Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия - структуры и приборы» (Санкт-Петербург, 2015), 2nd International conference on enhances spectroscopies (Мессина, Италия, 2015), Ломоносовские чтения – 2016 (Москва, 2016), 7-я международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «Мокеровские чтения» (Москва, 2016), 11-я Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия:

структуры и приборы» (Москва, 2017), 8-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «Мокеровские чтения» (Москва, 2017), EMRS Fall Meeting 2017, Group III-Nitrides: fundamental research, optoelectronic devices and sensors (Варшава, Польша, 2017), Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2019» (Москва, 2019).

Публикации

Основные результаты диссертации изложены в 20 печатных работах, в том числе в 5 статьях в рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих Положению о присуждении ученых степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова, 1 статье в нерецензируемом журнале и 14 публикациях в сборниках трудов и тезисов конференций. Полный список работ автора приведен в конце автореферата перед списком литературы.

Достоверность результатов обеспечивается воспроизводимостью полученных спектров всеми экспериментальными методами, используемыми в работе; сопоставлением промежуточных результатов как с результатами, полученными другими авторами аналогичными методами на схожих образцах, так и между используемыми методиками.

Личный вклад автора

Описанные в диссертации экспериментальные установки по ЭО, ЭП и ФТ были доработаны и модифицированы автором лично, либо при его непосредственном участии. Кроме того, автором лично или при его непосредственном участии были получены экспериментальные результаты, проведён их анализ и обработка, сформулированы выводы, подготовлены публикации и выступления на конференциях.

Структура и объём диссертации

Диссертация содержит 8 частей: введение; главу, посвящённую основным сведениям о применяемых модуляционных методиках и общих свойствах объекта исследования; методическую главу с описанием экспериментальных установок и параметров исследуемых образцов; три главы с описанием и обсуждением результатов, полученных тремя модуляционными методиками соответственно; выводы; список литературы. Работа представлена на 102 страницах машинописного текста, включает 49 рисунков, 2 таблицы. Список литературы включает 114 наименований.

Содержание работы

Во **введении** раскрывается актуальность выбранного объекта исследования, преимущества и недостатки существующих и применённых оптических методов, формулируются цели, задачи и положения, выносимые на защиту диссертационной работы, а также описывается личный вклад автора, практическая значимость работы, научная новизна.

В **первой главе** описываются общие сведения о модуляционных методиках, применяемых в работе – ЭО, ЭП, ФТ. В отдельные разделы первой главы выведены преимущества, недостатки и особенности каждой используемой экспериментальной методики. Кроме того, приведены современные результаты, полученные с помощью ЭО, ЭП и ФТ для гетероструктур на основе GaN. Большое внимание уделено известным способам анализа спектров ЭО и ФТ для исследования внутренних электрических полей в гетероструктурах на основе InGaN/GaN. В частности, описан способ расчёта напряжённости внутренних электрических полей в активной области методом ЭО по аппроксимации зависимости энергии межзонного перехода между невозбуждёнными уровнями в КЯ. Приведён способ анализа низкоэнергетичного хвоста в спектрах ФТ, основанный на эффекте Франца-Келдыша, а также описана роль точки пересечения нормированных спектров ФТ при разном смещении p-n-перехода.

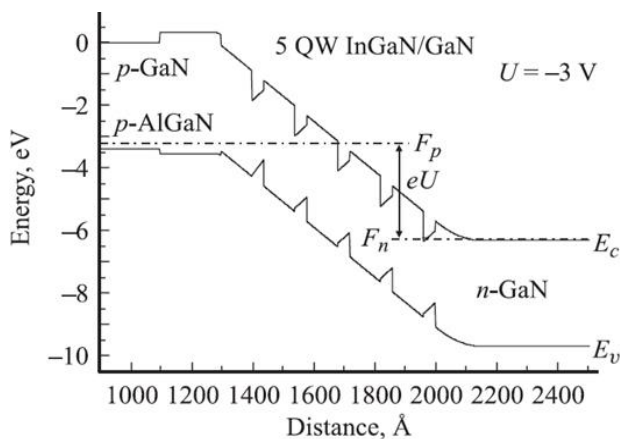


Рисунок 1 – Классическая энергетическая диаграмма p-n-гетероструктуры с пятью квантовыми ямами InGaN/GaN при обратном смещении p-n-перехода $U_{DC} = -3$ В. E_c , E_v - края зоны проводимости и валентной зоны соответственно, F_n , F_p - квазиуровни Ферми в n- и p- областях [23]

Последний раздел данной главы посвящён свойствам светодиодных гетероструктур на основе квантовых ям InGaN/GaN, расположенных в p-n-переходе. Приводятся необходимые для понимания материала диссертационной работы данные о способах получения и зонной структуре объекта исследования (Рисунок 1). Описан механизм возникновения внутренних электрических полей и их влияние на эффективность свечения. Приведённая подборка актуальных результатов основана как на классических работах, так и на современных статьях по исследуемой тематике.

Во **второй главе** приводятся детальные описания объектов исследования и экспериментальных установок, используемых в диссертации. В качестве базовой была взята установка для регистрации спектров ЭО методом синхронного детектирования [24], которая модифицировалась путём добавления дополнительного фотоприёмника для фиксации интенсивности проходящего излучения для регистрации спектров ЭП (Рисунок 2). Это позволило проводить одновременные измерения коэффициентов отражения R и пропускания T , а также их изменения ΔR и ΔT под воздействием внешнего модулирующего электрического поля с генератора. Такое внешнее

электрическое поле прикладывалось к контактам р-п-перехода и имело постоянную составляющую U_{DC} и переменную U_{AC} (меандр), которая являлась опорной для синхронного детектора.

Аналогично осуществлялась регистрация спектров ФТ, но фотоприёмником выступал сам образец, а электрическое поле модулировалось механическим прерывателем, который модулировал интенсивность зондирующего луча от монохроматора. Возникающий в образце фототок регистрировался синхронным детектором (опорный сигнал приходил от оптопары прерывателя).

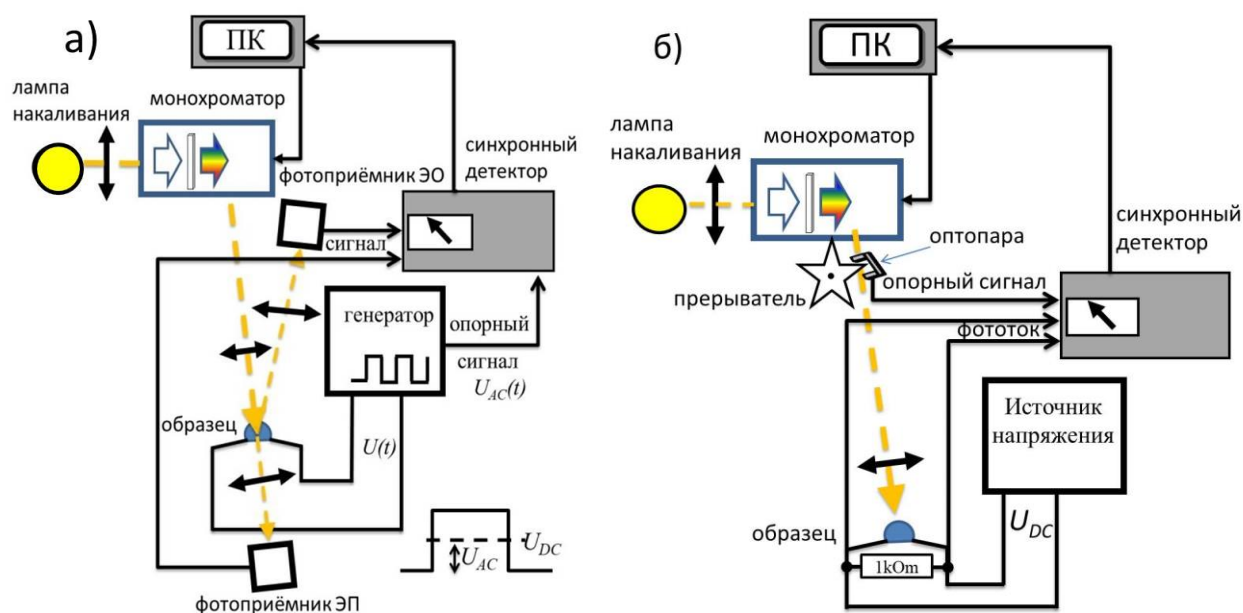


Рисунок 2 – Схемы регистрации спектров ЭО, ЭП (а) и ФТ (б)

Образцы производства «Phillips» серии «LumiLEDs», отличающиеся разной длиной волны свечения (синий, голубой, сине-зелёный, зелёный; №№ ЛЛ1, ЛЛ2, ЛЛ3, ЛЛ4), и образцы производства ЗАО «Светлана-оптоэлектроника» синего свечения (№СО1) представляли собой светодиодные гетероструктуры площадью $0,4 \text{ мм}^2$, упакованные в металлический корпус с теплоотводом и линзой. Такие образцы имели по 5 одинаковых КЯ InGaN/GaN в активной области. Светодиодные гетероструктуры производства ЗАО НПЦ «Полус», отличающиеся числом квантовых ям в активной области (одна, две, три и пять КЯ: №№ П1, П2, П3, П5), имели максимум интенсивности люминесценции в зелёной области видимого спектра и были выращены на отполированной с двух сторон подложке диаметром 50,8 мм. Увеличение коэффициента пропускания за счёт такой полировки поверхностей подложки дало возможность провести измерения спектров ЭП.

Все образцы были выращены методом газофазной эпитаксии на сапфировых подложках в полярном направлении [0001]. Прикладываемое во всех экспериментах

постоянное смещение U_{DC} не превышало пороговое напряжение, необходимое для свечения. Таким образом, излучательная рекомбинация отсутствовала, а всё падение напряжения приходилось на высокоомную активную область.

Третья глава посвящена исследованиям методом ЭО – оценке распределения внутренних электрических полей в активной области светодиодных гетероструктур с разной длиной волны свечения, а также проявлению электрооптического эффекта в спектрах ЭО.

Обнаруженные интерференционные экстремумы в диапазоне энергий 1,3-2,4 эВ для образца №CO1 монотонно изменяют знак на противоположный при изменении смещения U_{DC} (Рисунок 3) [A1]. Такое поведение спектральных полос, образованных путём сложения волн от подложки и края активной области, объясняется электрооптическим эффектом. Под действием внешнего электрического поля показатель преломления слоёв InGaN и GaN изменяется по-разному. При некоторых U_{DC} возникает ситуация, когда разность показателей преломления этих слоёв меняет знак, а значит, меняет знак разность фаз интерферирующих

волн. Это приводит к смене максимумов интерференционных полос на минимумы в спектрах ЭО. Такое объяснение позволило рассчитать электрооптический коэффициент для слоя $\text{In}_{0,12}\text{Ga}_{0,88}\text{N}$ r_{13} , который составил (22 ± 6) пм/В [A2].

Для оценки распределения напряжённости электрических полей в активной области в образцах серии «ЛЛ» при разных смещениях р-п-перехода спектры ЭО были преобразованы с помощью соотношений Крамерса-Кронига. Пример преобразования спектра ЭО для образца синего свечения ЛЛ2 приведён на Рисунке 4а [A3]. Такой приём позволяет выделить положения линий ЭО, связанных с энергиями межзонных переходов. Зависимость энергии получившихся пиков от U_{DC} показана на Рисунке 4б. Видно, что энергии межзонных переходов разных линий отличаются, что свидетельствует о разном положении связанных состояний электронов и дырок в разных КЯ активной области. Это

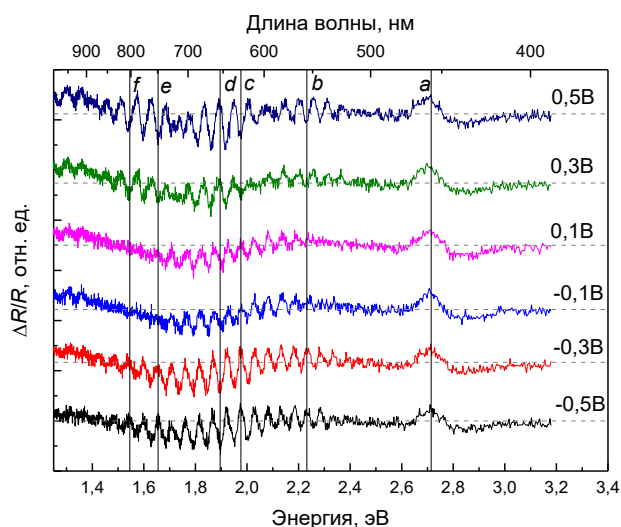


Рисунок 3 – Серия спектров ЭО образца №CO1. Линией «а» обозначена область спектра, связанная с межзонными эффектами в активной области квантовых ям, а линиями «b, c, d, e, f» обозначены длины волн спектра, на которых экстремумы интерференции меняют знак

энергии межзонных переходов разных линий отличаются, что свидетельствует о разном положении связанных состояний электронов и дырок в разных КЯ активной области. Это

может быть следствием проявления эффекта Штарка при неоднородном распределении электрического поля по активной области [A4, A5].

Полученные энергии переходов позволили дать оценку напряжённости внутренних электрических полей в рамках модели треугольной КЯ с бесконечными стенками в разных КЯ для всех образцов серии «ЛЛ». Для проведения такой оценки дополнительно были получены значения ширины запрещённой зоны слоя InGaN для каждого образца известным приёмом с помощью метода ФТ [19].

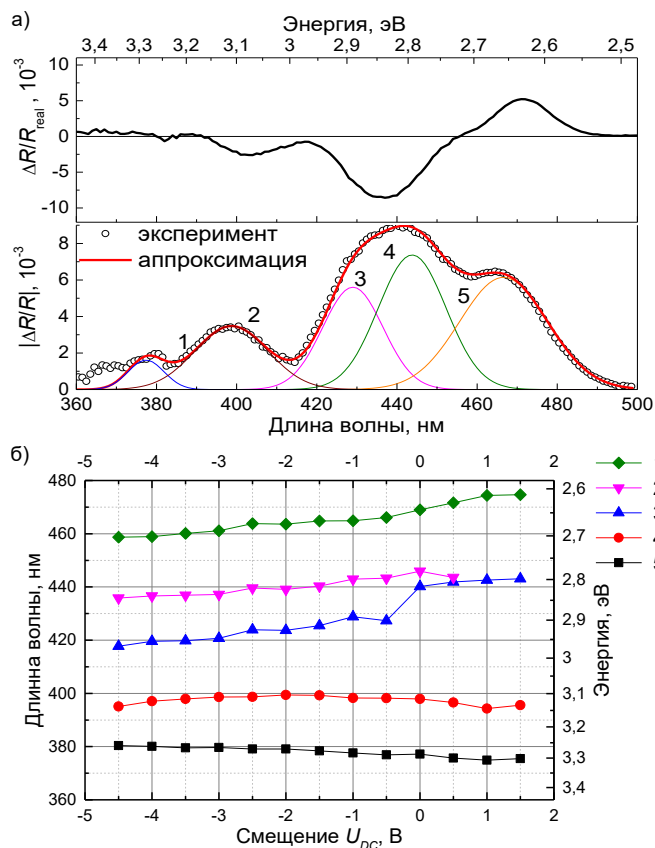


Рисунок 4 – а) Спектр ЭО образца №ЛЛ2 при $U_{DC} = -1,0$ В и пример его преобразования с помощью соотношений Крамерса-Кронига. Верхний график – исходный спектр ЭО. Нижний график – преобразованный спектр ЭО. На преобразованном спектре показан пример аппроксимации суммой пяти линий Гаусса. Цифрами обозначены номера линий. б) Зависимость положения спектрального пика от смещения U_{DC} для различных межзонных переходов

Результаты оценки для образцов серии «ЛЛ» приведены на Рисунке 5. Неоднородность электрического поля может быть вызвана разными коэффициентами теплового расширения слоёв InGaN, GaN и p-AlGaN (слой блокирующий поперечный транспорт электронов, Рисунок 1), вследствие чего образуется разное рассогласование постоянных кристаллических решёток. Кроме того, слой p-GaN, легированный Mg, часто выращивают при более низкой температуре, чем слой n-GaN, легированный Si. В результате КЯ, расположенные близко к n-GaN или p-GaN, играют роль буферных слоёв, уменьшающих механические напряжения в центральной КЯ. Таким образом, слои, расположенные в центре активной области, могут иметь наименьшее рассогласование постоянной кристаллической решётки. Наблюдаемый общий рост напряжённости электрического поля с ростом концентрации индия в слое InGaN закономерен, так как в этом случае растёт рассогласование постоянных кристаллических решёток слоёв InGaN/GaN.

В четвёртой главе исследуются внутренние электрические поля образцов

серии «П» с разным числом КЯ InGaN/GaN в активной области методом ЭП. В первом разделе приводится методика расчёта уровней энергий в напряжённой квантовой яме конечной глубины с помощью решения уравнения Шрёдингера. Описанная методика позволит в дальнейшем использовать напряжённость электрического поля в КЯ как параметр для аппроксимации зависимости энергии межзонного перехода между невозбуждёнными уровнями от смещения U_{DC} . Использование именно такого профиля потенциала оправдано, когда внешние электрические поля в достаточной степени компенсируют внутренние. В этом случае, при небольшой суммарной напряжённости электрического поля в КЯ, результаты методики расчёта уровней энергий из третьей главы для треугольного потенциала с бесконечными стенками существенно отличаются и от экспериментальных данных, и от уровней энергий, полученных в рамках модели с ограниченными квантовыми барьерами.

Спектры ЭП, полученные при разных U_{DC} в диапазоне от -21 до +4 В для образцов с

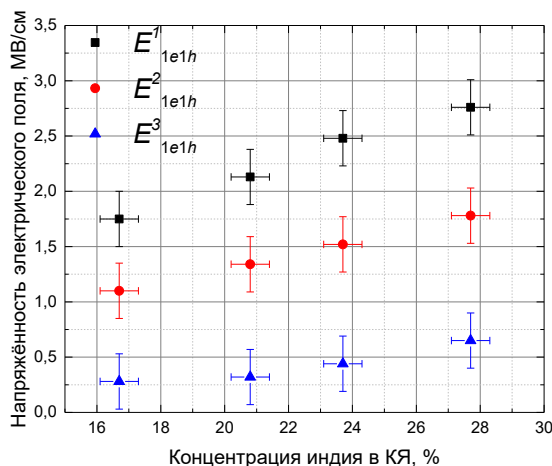


Рисунок 5 — Зависимость напряжённости электрического поля в разных КЯ активной области от концентрации индия в слое $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Синие треугольники, красные круги и чёрные квадраты обозначают напряжённость электрического поля в КЯ, соответствующие различным по энергиям переходам

одной, двумя, тремя и пятью КЯ InGaN/GaN в активной области, позволили определить энергии межзонных переходов различных типов: между невозбуждёнными уровнями в КЯ (А), между возбуждёнными уровнями в КЯ (В), между барьерами GaN, смежными (Е) и несмежными со слоями n-GaN и p-GaN (D), а также переходы между барьером валентной зоны и невозбуждённым уровнем в КЯ в зоне проводимости (С) (Рисунок 6, 7). Рост числа переходов последнего типа с разной энергией с ростом количества КЯ в активной области свидетельствует о неоднородном встраивании индия в КЯ активной области. Связанное с этим фактом размытие гетерограниц оказывается неодинаковым для разных КЯ, что приводит к отличиям в энергиях межзонных переходов для носителей зарядов, локализованных на границах слоёв InGaN/GaN.

Аппроксимация зависимостей низкоэнергетичной линии в спектрах ЭП, связанной с основным межзонным переходом (А), отвечающим за свечение гетероструктуры, от U_{DC} для образцов серии «П» привела к следующему результату. С ростом количества КЯ в активной области от одной до пяти средняя напряжённость внутренних электрических полей

уменьшается от 4,57 до 2,87 МВ/см. Таким образом, увеличение интенсивности люминесценции в гетероструктурах с несколькими квантовыми ямами обеспечивается не только за счёт уменьшения перенаселённости уровней в КЯ [25], но и за счёт уменьшения пространственного разделения электронов и дырок [А6].

В пятой главе представлены результаты исследования процессов поглощения образцов с разным количеством КЯ методом спектроскопии ФТ. В первом разделе описывается обнаруженный фотореверсивный эффект: при определённом смещении U_{DC} при поглощении излучения в диапазоне 350-500 нм направление фототока зависит от длины волны этого излучения (Рисунок 8). При поглощении, обозначенном на Рисунке 8 буквой «А», электрон из барьера валентной зоны оказывается в барьере зоны проводимости слоя GaN. Электроны, образованные таким образом, даже при прямом смещении р-п-перехода U_{DC} создают обратный ток. С увеличением прямого смещения U_{DC} напряжённость электрического поля в барьере уменьшается, зоны в барьере выравниваются и обратный ток прекращается. Наблюдается смещение в коротковолновую область спектра.

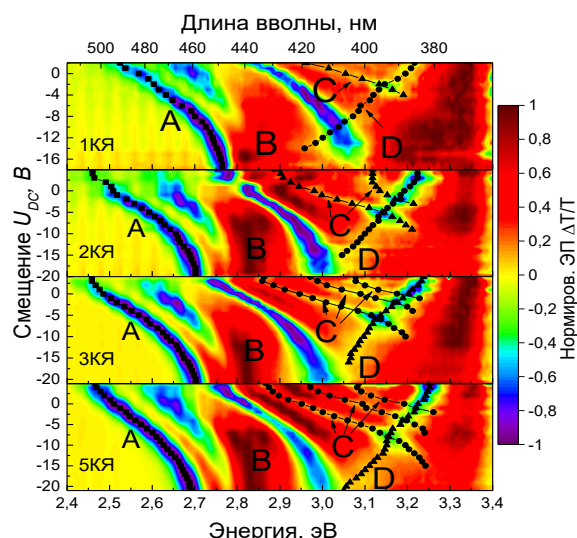


Рисунок 6 – Нормированные спектры ЭП при разных смещениях р-п-перехода U_{DC} для образцов с разным количеством КЯ в активной области

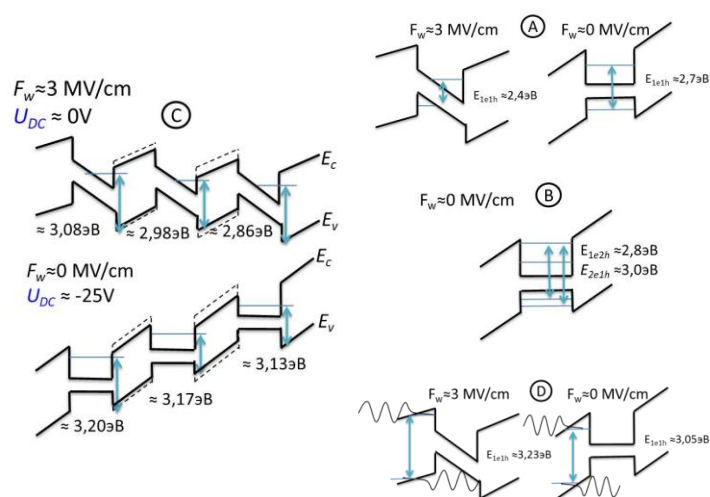


Рисунок 7 – Схемы различных типов межзонных переходов, наблюдаемых на спектрах ЭП. Буквами А-Е обозначены соответствующие линии на Рисунке 6

Поглощение, обозначенное на Рисунке 8 буквой «Б», по-видимому, связано с переходом с акцепторного уровня в валентной зоне в барьерном слое около области р-GaN на уровни зоны проводимости. Потенциальный барьер в сторону р-области для таких электронов оказывается достаточно большим даже при малых отрицательных смещениях U_{DC} , чтобы возник прямой ток. С увеличением смещения U_{DC} прямой ток будет увеличиваться в соответствии с обычными процессами в гомогенном р-п-переходе. Такое

поведение тока наблюдается для всех образцов серии «П», однако с ростом количества КЯ, минимальное смещение U_{DC} , необходимое для такого эффекта, растёт.

Во втором разделе данной главы проводятся исследования неоднородности ширины запрещённой зоны КЯ InGaN/GaN в активной области методом ФТ. Для этого серии спектров ФТ, измеренные в диапазоне смещений U_{DC} от -14 до +2 В, были нормированы для каждого образца. Этот известный приём, позволяющий выделить энергию запрещённой зоны КЯ как точку пересечения нормированных спектров, был использован в главе 3 [19]. Такая точка образуется при рассмотрении эффекта Франца-Келдыша при разных наклонах зон под действием электрического поля. При этом площадь под коротковолновым хвостом нормированного спектра ФТ характеризует напряжённость электрического поля. Однако в спектрах ФТ для образцов с разным количеством КЯ обнаружено несколько таких точек пересечений, которые проявлялись и исчезали по мере изменения смещения U_{DC} (Рисунок 9).

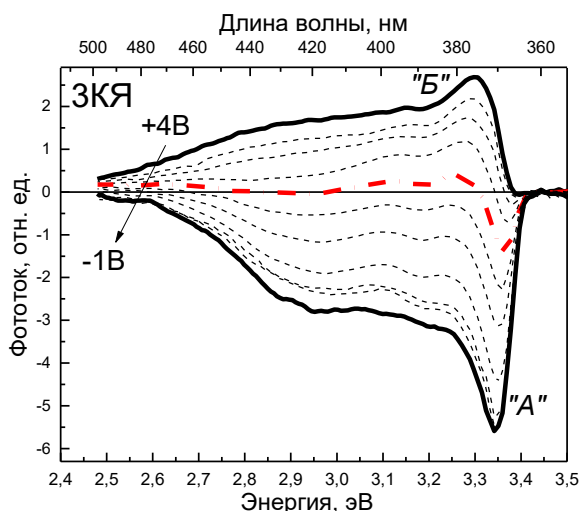


Рисунок 8 — Иллюстрация фотореверсивного эффекта на примере спектров ФТ для светодиодной гетероструктуры на основе InGaN/GaN с тремя КЯ. Красной штрихпунктирной линией выделен спектр ФТ при минимальном смещении p-n-перехода, при котором наблюдается фотореверсивный эффект

Такая динамика спектров ФТ свидетельствует о наложении сигнала от разных КЯ по мере изменения U_{DC} . Группировка нормированных спектров ФТ по диапазонам напряжений, когда можно выделить точки пересечения, и последующий анализ позволили оценить, насколько разные энергии запрещённой зоны присутствуют в гетероструктурах с несколькими КЯ.

Используя известную эмпирическую связь энергии запрещённой зоны с концентрацией индия x в соединении $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ [26], была сделана оценка распределения степени встраивания индия из КЯ активной области в соседние барьеры GaN для серии «П» светодиодных гетероструктур. В результате получено, что с ростом числа КЯ в активной области от одной до пяти средняя концентрация индия монотонно растёт от 21 до 22%, при этом размах концентрации (разность

между максимальной и минимальной концентрацией среди всех КЯ активной области) доходит до 4%.

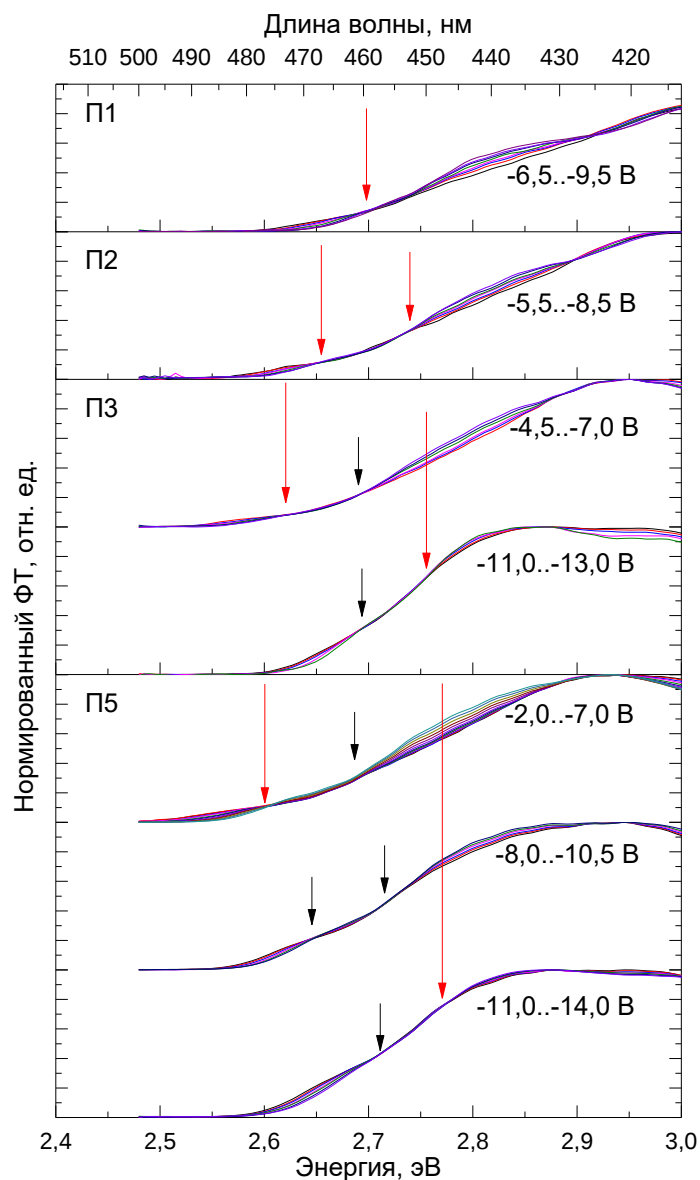


Рисунок 9 – Нормированные спектры ФТ при разных диапазонах смещения р-п-перехода U_{DC} для образцов серии «П». Стрелками обозначены энергии, соответствующие ширине запрещённой зоны КЯ. Красными стрелками обозначены границы запрещённых зон для каждого образца.

Как отмечалось в работах [27,28], такое поведение может быть объяснено увеличением эффективности вхождения индия в барьерные слои с уменьшением напряжения на гетерограницах. Этот вывод подтверждается результатом, полученным в главе 4, касающимся величин напряжённостей пьезоэлектрических полей в образцах серии «П».

В **шестой главе** приводится сравнение спектров, полученных тремя модуляционными методиками, на примере образца с тремя КЯ (№ПЗ) (Рисунок 10). Показывается, что минимумы в спектрах ЭП расположены между экстремумами разных знаков ЭО, что

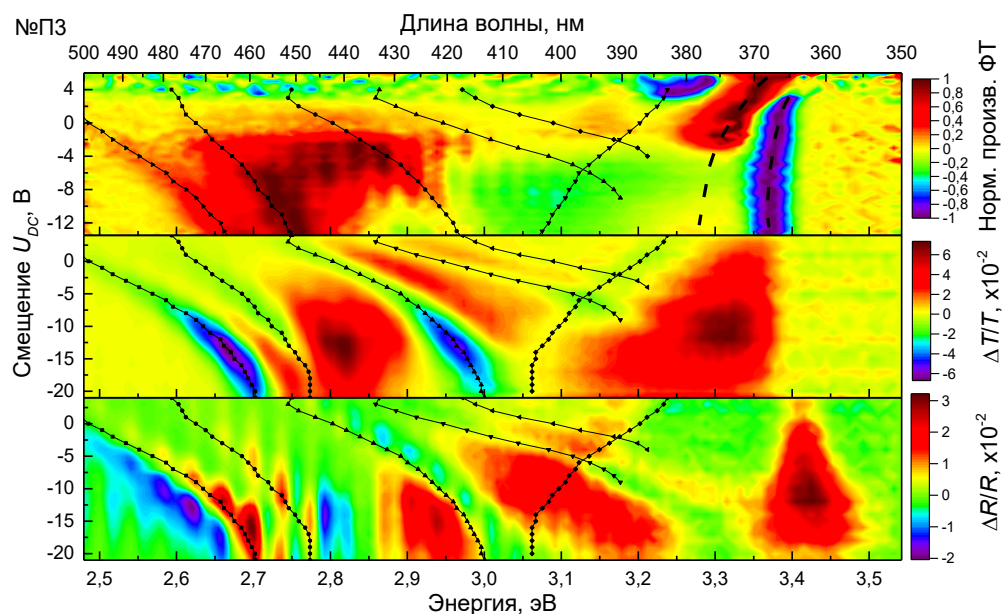


Рисунок 10 – Сравнение методов ЭО (нижняя серия спектров), ЭП (серия спектров посередине) и производной ФТ по длине волны (верхняя серия спектров) на примере образца №ПЗ. На спектры нанесены энергии переходов, полученные из соответствующих спектров ЭП. Пунктирной чёрной линией обозначены барьерные переходы, связанные с ДАП и слоями $p\text{-GaN}$ и $n\text{-GaN}$.

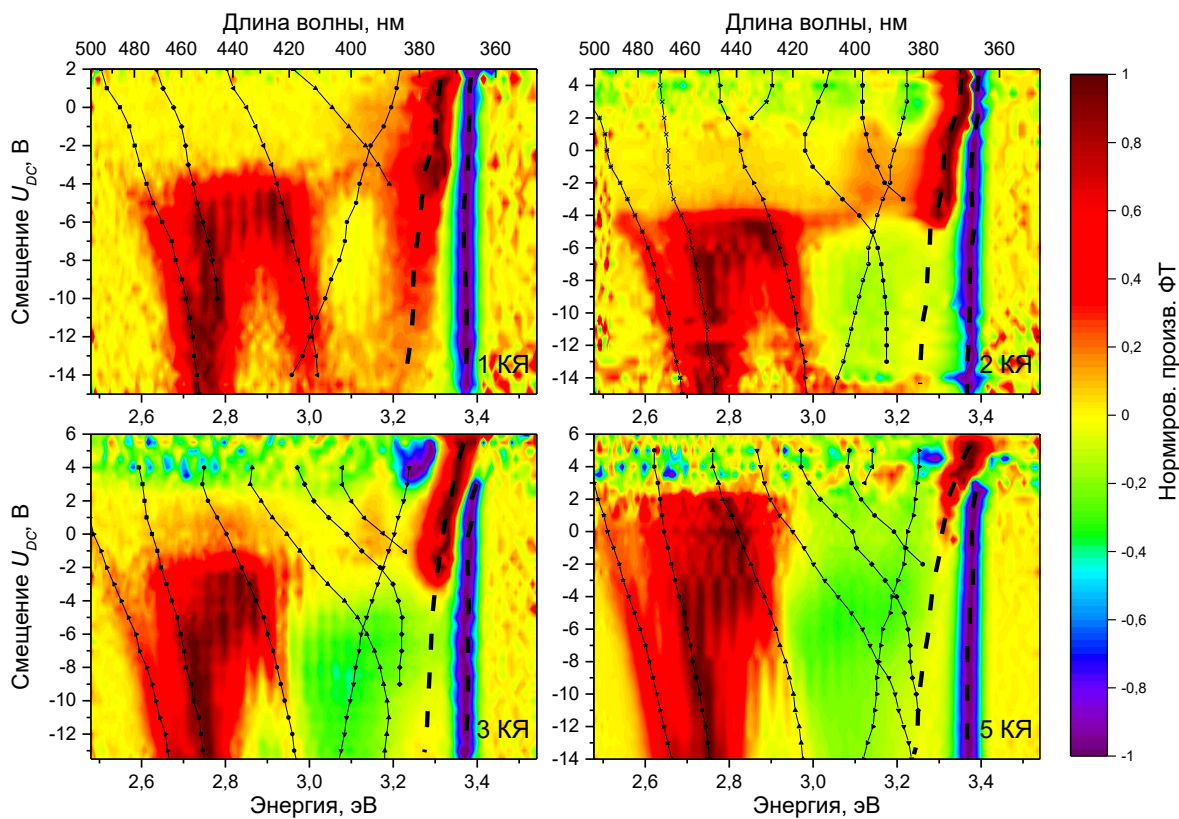


Рисунок 11 – Производные спектров ФТ по длине волны при разных смещениях U_{DC} для серии «П». На спектры нанесены энергии переходов, полученные из соответствующих спектров ЭП. Пунктирной чёрной линией обозначены барьерные переходы

подтверждает сделанное в четвёртой главе отнесение минимумов ЭП к межзонным переходам. Соответствующие низкоэнергетичные линии, связанные с межзонными переходами в КЯ InGaN/GaN, согласуются с максимумами в спектрах производной ФТ. При этом часть линий в диапазоне энергий 3,0-3,2 эВ на спектрах производной ФТ отсутствуют. С другой стороны, на спектрах производной ФТ разрешаются барьерные переходы с энергией 3,2-3,3 эВ, которые не были разрешены на спектрах ЭП. Такие качественные результаты, по-новому открывающие перспективы использования метода ФТ, были сделаны для всех образцов серии «П» (Рисунок 11).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Методами модуляционной спектроскопии ЭО, ЭП и ФТ при комнатной температуре исследованы внутренние электрические поля активной области СД гетероструктур с квантовыми ямами на основе InGaN/GaN, а также эффекты, связанные с интерференцией и поглощением света в активной области.

- В спектрах электроотражения активной области светодиодных InGaN/GaN гетероструктур обнаружена смена фазы интерферирующих волн при изменении смещения р-п-перехода. Это объясняется изменением знака разности показателей преломления слоёв InGaN и GaN вследствие электрооптического эффекта. Электрооптический коэффициент для слоя InGaN, полученный в рамках такой модели, составил $r_{13}=(22\pm6)$ пм/В.
- Разработана методика оценки напряжённости электрического поля в КЯ InGaN/GaN при малых смещениях р-п-перехода U_{DC} по зависимости энергии перехода между невозбуждёнными состояниями в КЯ в валентной зоны и зоны проводимости от U_{DC} . В результате анализа спектров ЭО с помощью данной методики получена оценка распределения напряжённости электрического поля в КЯ InGaN/GaN по толщине активной области для образцов разной длины волны свечения. Максимальная неоднородность напряжённости электрического поля наблюдается у образца зелёного свечения, что обусловлено наиболее сильным рассогласованием постоянных кристаллических решёток слоёв InGaN и GaN.
- Разработана методика расчёта напряжённости электрического поля в КЯ InGaN/GaN в зависимости от смещения р-п-перехода U_{DC} , основанная на решении уравнения Шрёдингера для напряжённой КЯ конечной глубины. В результате анализа спектров ЭП с помощью данной методики обнаружено, что с ростом количества КЯ InGaN/GaN в активной области СД кристаллов зелёного свечения средняя напряжённость электрического поля в КЯ уменьшается от 4,57 МВ/см для одной КЯ до 2,87 МВ/см для пяти. Качественно показано

соответствующее увеличение интенсивности люминесценции гетероструктуры с максимальным количеством КЯ.

- Методом спектроскопии ФТ обнаружен фотореверсивный эффект в СД гетероструктурах зелёного свечения с КЯ InGaN/GaN, заключающийся в изменении направления ФТ, индуцированного в структуре, при изменении длины волны возбуждающего излучения в диапазоне 350-500 нм.
- Методами электропропускания и фототока обнаружено, что с ростом числа КЯ в активной области растёт количество переходов, связанных с размытием гетерограниц InGaN/GaN, вследствие разной степени встраивания атомов In из разных КЯ в барьеры GaN.
- Показано, что модуляционные методики ЭП, ЭО и ФТ являются взаимно дополняющими. В частности, установлено, что энергии, соответствующие минимумам в спектрах ЭП, совпадают с энергиями переходов в спектрах ЭО и с максимумами производной по длине волны спектров ФТ. При этом в методе ЭП присутствуют линии, которые не проявляются на спектрах производной ФТ, и, наоборот, некоторые типы барьерных переходов, разрешимых на спектрах производной ФТ, неразрешимы на спектрах ЭП.

Таким образом, комплексное использование модуляционных методов ЭО, ЭП и ФТ совместно с разработанными в диссертации методиками позволяет проводить исследования зонной структуры, внутренних электрических полей и электрооптических свойств светодиодных гетероструктур с множественными квантовыми ямами на основе соединений InGaN/GaN.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих Положению о присуждении ученых степеней в МГУ им. М.В. Ломоносова:

- A1. Avakyants L.P., Aslanyan A.E., Bokov P. Yu., Polozhentsev K. Yu., Chervyakov A.V. Linear electro-optic effect in electroreflectance spectra of AlGaIn/GaN light emitting diodes structures // Jpn. J. Appl. Phys. 2013.
- A2. Авакянц Л.П., Асланян А.Э., Боков П.Ю., Положенцев К.Ю., Червяков А.В. Спектры электроотражения множественных квантовых ям InGaIn/GaN, помещенных в неоднородное электрическое поле рп-перехода // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51, № 2. С. 198–201.

- A3. Avakyants L.P., Aslanyan A.E., Bokov P.Yu., Polozhentsev K. Yu., Chervyakov A.V. Study of built-in electric field in active region of GaN/InGaN/AlGaN LEDs by electroreflectance spectroscopy // Solid. State. Electron. Elsevier, 2017. T. 130. С. 45–48.
- A4. Avakyants L., Aslanyan A., Bokov P., Polozhentsev K., Chervyakov A. The difference between reflectance and electroreflectance spectra of AlGaN/GaN/InGaN LED structures // Phys. status solidi c. Wiley Online Library, 2012. T. 9, № 3–4. С. 818–821.
- A5. Аслаян А.Э., Авакянц Л.П., Боков П.Ю., Червяков А.В. Исследование распределения встроенных электрических полей в светодиодных гетероструктурах с множественными квантовыми ямами GaN/InGaN методом электроотражения // Физика и техника полупроводников. 2019. Т. 53, № 4. С. 493–499.

Публикации в нерецензуемых научных журналах:

- A6. Авакянц Л.П., Аслаян А.Э., Боков П.Ю., Волков В.В., Матешев И.С., Туркин А.Н., Червяков А.В., Юнович А.Э. Люминесцентные и электрические свойства ультрафиолетовых и фиолетовых светодиодов из гетероструктур на основе нитрида галлия // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2016. № 3. С. 163401.

Тезисы докладов в сборниках конференций:

- A7. Аслаян А.Э. Исследование внутренних электрических полей в светодиодных гетероструктурах на основе квантовых ям InGaN/GaN методом спектроскопии электропропускания // Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2019», секция «Физика», подсекция «Оптика». (Москва, 8-12 апреля 2019), С. 467-468.
- A8. Avakyants L.P., Aslanyan A.E., Bokov P.Yu., Chervyakov A.V. Electroreflectance study of built-in electric field distribution in GaN/InGaN multiple quantum wells // EMRS Fall Meeting 2017, Group III-Nitrides: fundamental research, optoelectronic devices and sensors. (Польша, Варшава, 18-22 сентября 2017). С. P-50.
- A9. Авакянц Л.П., Аслаян А.Э., Боков П.Ю., Волков В.В., Коган Л.М., Туркин А.Н., Червяков А.В., Юнович А.Э. Спектры электролюминесценции и электроотражения светодиодных гетероструктур на основе нитрида галлия // 8-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники "Мокеровские чтения". (Москва, 24 мая 2017). С. 142.

- A10. Авакянц Л.П., Аслабян А.Э., Боков П.Ю., Волков В.В., Коган Л.М., Матешев И.С., Туркин А.Н., Червяков А.В., Юнович А.Э. Особенности спектров электролюминесценции светодиодов в коротковолновой области спектра // 11-я Всероссийская конференция "Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы". (Москва, 1-3 февраля 2017). С. 88.
- A11. Аслабян А.Э., Боков П.Ю., Волков В.В., Коган Л.М., Авакянц Л.П., Матешев И.С., Туркин А.Н., Червяков А.В., Юнович А.Э. Спектры электроотражения светодиодных гетероструктур InGaN/GaN в синей области спектра // 11 Всероссийская конференция "Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы". (Москва, 1-3 февраля 2017). С. 90.
- A12. Авакянц Л.П., Аслабян А.Э., Боков П.Ю., Волков В.В., Коган Л.М., Туркин А.Н., Червяков А.В., Юнович А.Э. Особенности спектров электролюминесценции ультрафиолетовых и фиолетовых светодиодов // 7-я международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники "Мокеровские чтения". (Москва, 25 мая 2016). С. 129.
- A13. Авакянц Л.П., Аслабян А.Э., Боков П.Ю., Волков В.В., Матешев И.С., Туркин А.Н., Червяков А.В., Юнович А.Э. Люминесцентные и электрические свойства ультрафиолетовых и фиолетовых светодиодов из гетероструктур на основе нитрида галлия // Ломоносовские чтения – 2016. (Москва, 18-27 апреля 2016). С. 7-8.
- A14. Avakyants L.P., Aslanyan A.E., Bokov P.Y., Chervyakov A.V., Polozhentsev K.Y. Electroreflectance estimation of built-in electric field inhomogeneity in active region of AlGaIn/InGaIn/GaN light emitting diodes // 2nd International conference on enhances spectroscopies. (Италия, Мессина, 12-15 октября 2015). С. 187.
- A15. Авакянц Л.П., Аслабян А.Э., Боков П.Ю., Положенцев К.Ю., Червяков А.В. Оценка неоднородности встроенных электрических полей в активной области множественных квантовых ям светодиодной гетероструктуры InGaIn/AlGaIn/GaN методом спектроскопии электроотражения // 10-я Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия - структуры и приборы». (Санкт-Петербург, 23-25 марта 2015). С. 25-26.
- A16. Avakyants L., Aslanyan A., Bokov P., Chervyakov A., Polozhentsev K. Electroreflectance from Multiple InGaIn/GaN Quantum Wells: Interference Effects // 32 International Conference on Physics of Semiconductors. (СИИА, Техас, Аустин, 10-15 августа 2014), С. E10.
- A17. Avakyants L., Aslanyan A., Bokov P., Charvyakov A., Polozhentsev K. Evaluation of the Internal Electric Field Inhomogeneities in Multiple InGaIn/GaN Quantum Wells Structures

Using Electroreflectance Spectroscopy // International Workshop on Nitride Semiconductors IWN2014. (Польша, Вроцлав, 24-29 августа 2014).

- A18. Авакянц Л.П., Аслanian А.Э., Боков П.Ю., Положенцев К.Ю., Червяков А.В. Линейный электрооптический эффект в светодиодной гетероструктуре GaN/InGaN/AlGaN // 9-я Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы». (Москва, 13-15 июня 2013). С. 166-167.
- A19. Аслanian А.Э., Положенцев К.Ю., Боков П.Ю. Электроотражение от множественных квантовых ям InGaN, помещенных в неоднородное электрическое поле рп перехода // 15-я Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и нанoeлектронике. (Санкт-Петербург, 25-29 ноября 2013).
- A20. Avakyants L., Aslanyan A., Bokov P., Chervyakov A., Polozhentsev K. Electrooptical effect in electroreflectance spectra of AlGaIn/InGaIn/GaN LED structures // International Workshop on Nitride Semiconductors IWN2012. (Япония, Саппоро, 14-19 октября 2012).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bougrov V. и др. Properties of Advanced Semiconductor Materials GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe // Eds. Levinshtein ME, Rumyantsev SL, Shur MS, John Wiley & Sons, Inc., New York. 2001. 1-30 с.
2. Palacios T. и др. AlGaIn/GaN high electron mobility transistors with InGaIn back-barriers // IEEE Electron Device Lett. IEEE, 2006. Т. 27, № 1. С. 13–15.
3. Zhang L. The optical Kerr effect in wurtzite GaN-based double quantum wells: influences of piezoelectricity and spontaneous polarization // Mod. Phys. Lett. B. World Scientific, 2009. Т. 23, № 15. С. 1923–1934.
4. Leung M.M.Y.Y., Djurišić A.B., Li E.H. Refractive index of InGaIn/GaN quantum well // J. Appl. Phys. AIP, 1998. Т. 84, № 11. С. 6312–6317.
5. Schubert E.F. Light-emitting diodes. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
6. Jiang H.X., Lin J.Y. AlGaIn and InAlGaIn alloys-epitaxial growth, optical and electrical properties, and applications // Optoelectron. Rev. 2002. № 4. С. 271–286.
7. Куэй Р. Электроника на основе нитрида галлия / под ред. Васильев А.Г. Москва: Техносфера, 2011. 587 с.
8. Sze S.M., Ng K.K. Physics of semiconductor devices. John wiley & sons, 2006.
9. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/ [Электронный ресурс].

10. Amano H. и др. P-type conduction in Mg-doped GaN treated with low-energy electron beam irradiation (LEEBI) // Jpn. J. Appl. Phys. IOP Publishing, 1989. Т. 28, № 12A. С. L2112.
11. Akasaki I. и др. Photoluminescence of Mg-doped p-type GaN and electroluminescence of GaN pn junction LED // J. Lumin. Elsevier, 1991. Т. 48. С. 666–670.
12. Akasaki I. GaN-based UV/blue light emitting devices // Inst. Phys. Conf. Ser. 1992. С. 851–856.
13. Nakamura S. и др. High-brightness InGaN blue, green and yellow light-emitting diodes with quantum well structures // Jpn. J. Appl. Phys. IOP Publishing, 1995. Т. 34, № 7A. С. L797.
14. Nakamura S. и др. Thermal annealing effects on p-type Mg-doped GaN films // Jpn. J. Appl. Phys. IOP Publishing, 1992. Т. 31, № 2B. С. L139.
15. Wetzel C. и др. Discrete Stark-Like Ladder in Piezoelectric GaInN/GaN Quantum Wells // Phys. Status Solidi Basic Res. 2002. Т. 216, № 1. С. 399–403.
16. Zhao H. и др. Approaches for high internal quantum efficiency green InGaN light-emitting diodes with large overlap quantum wells // Opt. Express. Optical Society of America, 2011. Т. 19, № 104. С. A991--A1007.
17. Zhang F. и др. Reduction of polarization field strength in fully strained c-Plane InGaN/(In) GaN multiple quantum wells grown by MOCVD // Nanoscale Res. Lett. Springer, 2016. Т. 11, № 1. С. 519.
18. Renner F. и др. Quantitative analysis of the polarization fields and absorption changes in InGaN/GaN quantum wells with electroabsorption spectroscopy // Appl. Phys. Lett. AIP, 2002. Т. 81, № 3. С. 490–492.
19. Franssen G., Perlin P., Suski T. Photocurrent spectroscopy as a tool for determining piezoelectric fields in In_xGa_{1-x}N/GaN multiple quantum well light emitting diodes // Phys. Rev. B. APS, 2004. Т. 69, № 4. С. 45310.
20. Ryu H.Y. и др. A comparative study of efficiency droop and internal electric field for InGaN blue lighting-emitting diodes on silicon and sapphire substrates // Sci. Rep. Nature Publishing Group, 2017. Т. 7. С. 44814.
21. Park S.-I. и др. Measurement of internal electric field in GaN-based light-emitting diodes // IEEE J. Quantum Electron. IEEE, 2012. Т. 48, № 4. С. 500–506.
22. Kim C.S. и др. Temperature-and bias-dependent study of photocurrent spectroscopy in an InGaN light-emitting diode operating near 400 nm // J. Korean Phys. Soc. 2010. Т. 57, № 4. С. 793–796.
23. Авакянц Л.П. и др. Спектры электроотражения гетероструктур с квантовыми ямами типа InGaN/AlGaIn/GaN // Физика и техника полупроводников. 2007. Т. 41, № 9. С. 1078–1084.

24. Авакянц Л.П., Боков П.Ю., Червяков А.В. Автоматизированная установка для регистрации спектров фотоотражения с использованием двойного монохроматора // Журнал технической физики. 2005. Т. 75, № 10. С. 66–68.
25. Chichibu S. и др. Spontaneous emission of localized excitons in InGaN single and multiquantum well structures // Appl. Phys. Lett. AIP, 1996. Т. 69, № 27. С. 4188–4190.
26. Pelá R.R. и др. Accurate band gaps of AlGaN, InGaN, and AlInN alloys calculations based on LDA-1/2 approach // Appl. Phys. Lett. AIP, 2011. Т. 98, № 15. С. 151907.
27. Стрельчук В.В. и др. Рентгеновская дифрактометрия и сканирующая микро-рамановская спектроскопия неоднородностей структуры и деформаций по глубине многослойной гетероструктуры InGaN/GaN // Физика и техника полупроводников. 2010. Т. 44, № 9. С. 1236–1247.
28. Сахаров А.В. и др. Влияние релаксации напряжений на формирование активной области гетероструктур InGaN/(Al) GaN для светодиодов зеленого диапазона // Физика и техника полупроводников. 2009. Т. 43, № 6. С. 841–846