

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н, профессора Снигирёва Олега Васильевича на диссертацию Асланяна Артёма Эдуардовича «Модуляционная спектроскопия светодиодных гетероструктур на основе InGaN/GaN», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – «Оптика».

Соединения InGaN/GaN, формирующие квантовые ямы в активной области p-n-перехода GaN, используются в качестве основного излучающего элемента мировыми лидерами-производителями эффективных и мощных коммерческих светодиодных гетероструктур ближнего ультрафиолетового, синего и зелёного диапазонов оптического спектра. Сильные пьезоэлектрические поля, характерные для таких гетероструктур при росте в полярном направлении [0001], являются серьёзной проблемой для дальнейшего повышения КПД светодиодов. Диссертационная работа Асланяна А.Э. посвящена разработке методов неразрушающего контроля InGaN/GaN гетероструктур с помощью комплекса методик оптической модуляционной спектроскопии: электроотражения, электропропускания и фототока. Тема диссертации несомненно актуальна и с научной, и с практической точек зрения.

Во введении описана цель и поставлены задачи работы, направленные на исследование внутренних электрических полей и электрооптических свойств светодиодных гетероструктур InGaN/GaN с разным количеством квантовых ям и разной концентрацией индия в тройном растворе. Подробно обосновывается выбор именно модуляционных спектральных методов исследования, их преимущества и недостатки. Раскрывается важность использования сразу нескольких таких методов для получения максимального количества информации об исследуемых структурах.

Обзор литературы содержит описание современных оптических методов исследования и свойств гетероструктур с квантовыми ямами InGaN/GaN. Приведены принципы модуляционных методик. Для методов электроотражения и фототока, как наиболее часто используемых среди модуляционных методов, приведены основные способы обработки спектров и примеры их использования для получения информации о зонной структуре. В частности, приведены работы по исследованию пьезоэлектрических полей, в одной из которых предсказываются экспериментально полученные автором в работе неоднородности напряжённостей таких электрических полей в квантовых ямах InGaN/GaN. Для метода электропропускания, помимо общего описания, сообщается о наличии лишь небольшого количества опубликованных работ для структур на основе InGaN/GaN. При этом те работы, что существуют, предполагают возможность более детального исследования зонной структуры.

Основная часть работы разбита на главы, соответствующие каждому из методов, и главы, со сравнительным анализом всех методов. Текст изложен на 102 страницах и содержит 49 рисунков, 2 таблицы и 114 источников в списке литературы.

В работе можно выделить ряд результатов интересных с точки зрения свойств гетероструктур на основе InGaN/GaN. К таким результатам можно отнести фотореверсивный эффект, позволяющий изменять направление тока за счёт изменения длины волны падающего на образец излучения. Применение гетероструктур, обладающих

таким эффектом, открывает возможность создания устройств, в которых направление и величина силы тока управляется за счёт небольшого изменения длины волны излучения.

Полезной информацией для разработчиков гетероструктур InGaN/GaN является обнаруженное автором снижение напряжённости внутренних электрических полей в квантовых ямах с ростом их количества в активной области. Этот результат, полученный методом электропропускания, согласуется с результатом о соответствующем росте размытия гетерограниц, полученным методом фототока, что свидетельствует о достоверности сделанных в работе выводах.

Методом электроотражения получена оценка распределения неоднородности электрических полей в отдельных квантовых ямах активной области для образцов с разной концентрацией индия в слоях InGaN. При этом был использован приём модификаций спектров электроотражения в более простую форму с помощью соотношений Крамерса-Кронига. Такой приём применялся для спектров электроотражения других соединений, но для гетероструктур на основе InGaN/GaN был использован впервые. Полученный результат позволяет подойти к разработке дизайна активной области с точки зрения формирования излучения посредством тех квантовых ям, в которых напряжённость электрического поля минимальна. Это приведёт к увеличению интеграла перекрытия волновых функций основных состояний электронов и дырок в квантовых ямах, что положительно скажется на вероятности рекомбинации и повышению КПД светодиода.

Автором показаны преимущества использования комплекса оптических модуляционных методов для получения обширной информации о зонной структуре активной области. Представленные методы обработки и интерпретации модуляционных спектров, могут быть применены не только к слоям InGaN/GaN, но и, например, к структурам на основе AlGaIn/GaN, применяемым в ультрафиолетовом диапазоне оптического спектра.

Среди конкретных результатов выделю разработку использования спектров фототока, а точнее их модификации, связанной с вычислением производной по длине волны, для определения энергий переходов в активной области. Кроме того, для определения размытия гетерограниц из-за встраивания индия из квантовых ям в барьерные слои доработан известный приём определения ширины запрещённой зоны по нормированным спектрам фототока. В результате проведён анализ размытия гетерограниц в образцах с разным количеством квантовых ям в активной области. Применение такого анализа позволяет говорить о спектроскопии фототока как о методе диагностики качества гетерограниц.

Стоит отметить показанные автором преимущества метода электропропускания перед другими оптическими методами. Полученные энергии переходов, связанные с барьерными переходами, достаточно хорошо разрешены и получены при комнатных температурах. Кроме того, благодаря главе 6, посвящённой сравнению модуляционных методик, можно сделать вывод о том, что метод электропропускания гораздо более информативен с точки зрения информации о зонной структуре и может давать более точные результаты для энергии самого важного перехода – между невозбуждёнными состояниями в квантовых ямах – чем метод электроотражения. Такой результат можно использовать в качестве рекомендации при выборе метода исследования зонной структуры или для модернизации уже готовой установки по методу электроотражения.

Таким образом, диссертационная работа Асланяна А.Э. демонстрирует возможности применения комплекса модуляционных оптических методов для анализа зонной структуры, с последующей оценкой ряда электрооптических свойств полупроводниковых гетероструктур на примере слоёв InGaN/GaN.

К недостаткам работы можно отнести следующее.

1. В главе 6 изложен качественный сравнительный анализ трёх модуляционных методов. Однако не приводятся математических соотношений, связывающих относительное изменение коэффициентов отражения и пропускания.

2. Отсутствует расчёт внутренних электрических полей в квантовых барьерах GaN активной области, хотя, судя по методике расчёта для квантовых ям, произвести такие вычисления можно на основе имеющихся спектров электропропускания или фототока. Такой расчёт, основанный на экспериментальных данных, позволил бы говорить о получении распределения напряжённости электрического поля во всей активной области, а не только в квантовых ямах.

3. Следует отметить, что метод фототока может быть реализован не только с помощью техники синхронного детектирования, но более простым способом, на базе точных, малошумящих измерителей силы тока.

4. Следует пожелать применение описанных методов для контроля гетероструктур на основе InGaN/GaN, разрабатываемых для высокочастотных транзисторов.

Несмотря на указанные недостатки, считаю, что диссертационная работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к кандидатским диссертациям. Результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в международных журналах, докладывались на нескольких всероссийских и международных конференциях.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.04.05 – «оптика», а также критериям, определённым пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Диссертация оформлена согласно положениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Асланян Артём Эдуардович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – «оптика».

Доктор физико-математических наук, профессор
заведующий кафедрой физики полупроводников и криоэлектроники
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, 119234, Москва, ул. Ленинские Горы, д. 1, стр. 2.
Телефон, e-mail: +7 (495) 939-59-34, oleg.snigirev@phys.msu.ru

31 мая 2019 г.

/ Снигирёв Олег Васильевич /

Подпись Снигирева О.В. заверяю
Ученый секретарь Ученого совета
физического факультета МГУ



Караваяев В.А.