

ОТЗЫВ

официального оппонента к.ф.-м.н., доцента Образцовой Елены Дмитриевны 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»

Наиболее распространённые оптические методы исследования полупроводниковых гетероструктур на основе нитрида галлия и его тройных растворов – фото- и электролюминесценция, спектроскопия отражения, пропускания и поглощения. Эти методы позволяют исследовать электрические и оптические свойства таких структур. Однако определение энергий межзонных переходов оказывается затруднительным, поскольку спектральные линии трудноразрешимы в многослойных структурах. Поэтому диссертационная работа Асланяна А.Э., посвящённая использованию модуляционных спектральных методов для исследования зонной структуры многослойных систем с квантовыми ямами InGaN/GaN, является актуальной. Разработанные автором методы определения энергии переходов таких структур позволили, в частности, рассчитать пьезоэлектрические поля в активной области, которые существенно влияют на излучательные характеристики InGaN/GaN светодиодов. Рекомендации, сделанные в данной работе, касающиеся как дизайна активной области, так и методики диагностики качества гетерограниц, определяют практическую значимость диссертационной работы.

Работа изложена на 102 страницах и содержит 49 рисунков, 2 таблицы и 114 источников в списке литературы. Во введении излагаются цели и задачи диссертационной работы. Также обосновывается актуальность исследования выбранных объектов и необходимость применения именно модуляционных методов, их преимущества и недостатки.

В первой главе описываются принципы модуляционных методов в целом, а также их особенности в случае спектроскопии электроотражения, электропропускания и фототока. Кроме того, для каждого метода приводятся примеры анализа соответствующих спектров, которые затем совершенствуются автором в последующих главах диссертации. Последний раздел данной главы посвящён основным свойствам гетероструктур на основе InGaN/GaN. Представленная информация даёт достаточный объём знаний, необходимых для понимания проведённых исследований.

Во второй главе подробно описываются детали экспериментальных установок, основой для которых является техника синхронного детектирования. Изложены отличия схем установки для получения спектров электроотражения от схем получения спектров фототока и электропропускания. В этой же главе приведены параметры используемых образцов.

Третья глава посвящена использованию метода электроотражения для исследования интерференционных эффектов и внутренних электрических полей в активной области светодиодов на основе InGaN/GaN. Наблюдаемая в эксперименте смена фазы интерференции в спектрах электроотражения объясняется электрооптическим эффектом. Это позволило найти соответствующие электрооптические коэффициенты.

Важным результатом этой главы представляется полученная оценка распределения электрического поля в квантовых ямах активной области. Используя преобразованные с помощью соотношений Крамерса-Кронига спектры электроотражения, автор связал положение спектральных пиков с напряжённостью электрического поля в активной области вследствие эффекта Штарка. Минимальные значения рассчитанных напряжённостей внутренних электрических полей в активной области позволили сделать выводы о соответствующей эффективности квантовых ям. Аналогичные расчёты были проведены для образцов с разной концентрацией индия в твёрдом растворе InGaN.

В четвёртой главе представлены результаты, полученные методом спектроскопии электропропускания на образцах с разным количеством квантовых ям в активной области. Проведенная интерпретация спектральных линий и соответствующих сдвигов при разном внешнем электрическом поле позволила получить данные о зонной структуре светодиодных образцов, в том числе о размытии гетерограниц отдельных квантовых ям.

Рассчитанные по сдвигу низкоэнергетичной линии в спектрах электропропускания в рамках модели напряжённой квантовой ямы конечной глубины напряжённости электрических полей позволили сделать заключение об уменьшении механического напряжения с ростом количества квантовых ям в слоях активной области. Это подтверждается сдвигом линии в спектрах электролюминесценции в силу эффекта Штарка. Кроме того, те же спектры электролюминесценции, зарегистрированные при одном и том же рабочем токе, позволяют говорить о снижении напряжённости электрического поля как об одном из факторов повышения эффективности излучательной рекомбинации гетероструктуры с ростом количества квантовых ям.

Пятая глава посвящена исследованиям методом фототока образцов с разным количеством квантовых ям. Развитие способа определения ширины запрещённой зоны с помощью нормированных спектров фототока позволило оценивать размытие гетерограниц и использовать метод фототока для диагностики качества гетерограниц. Следует отметить впервые обнаруженный фотореверсивный эффект, который дает возможность управления направлением фототока с помощью изменения длины волны излучения, и который, видимо, будет иметь прикладное развитие.

Последняя глава посвящена сравнению всех трёх методов. Качественно показаны преимущества методов электропропускания и фототока (а точнее, производной фототока по длине волны) перед методом электроотражения. Это проявляется как в более однозначном определении энергий переходов, так и в возможности получения большей информации о межзонных переходах, связанных с барьерами. При этом наибольшее количество разных переходов, а значит и данных о зонной структуре, можно получить, используя совместно оба метода – электропропускания и фототока.

Диссертация написано ясно, содержательно, хорошим языком. В ней развиты методы (фотоотражение, фотопропускание, фототок), достаточно редко встречающиеся в оптических исследованиях. Получены оригинальные интересные результаты.

Достоверность практически всех полученных в работе выводов подтверждается с помощью других методов в рамках данной диссертации или с помощью ссылок на работы других авторов. Кроме того, стоит отметить большое количество выступлений на

всероссийских и международных конференциях, где проводилась апробация диссертационной работы, а также наличие опубликованных статей в международных журналах. Текст автореферата отражает основное содержание диссертации.

Отмечу следующие недостатки работы:

1. Метод электропропускания может быть применён лишь к структурам, прозрачным для исследуемого оптического спектрального диапазона. Это значит, что смена подложки гетероструктуры с сапфировой, например, на кремниевую или карбид кремниевую приведёт к невозможности использования данного метода.

2. Напрашивается проведение исследований для образцов с количеством квантовых ям большим пяти. В текущем состоянии исследования непонятно, насколько сильно можно улучшить структуру, добавляя квантовые ямы в активную область.

3. В 6 главе или в обзоре литературы не приведено соотношений между производной фототока и коэффициентом поглощения, который в свою очередь должен фигурировать в соотношениях с коэффициентами отражения и пропускания и их производными, получаемыми методами электроотражения и электропропускания.

4. Интересно было бы сравнить данные, полученные в диссертации, с данными традиционных оптических методов, например, фотолюминесцентной спектроскопии с варьируемой длиной волны возбуждения.

Указанные недостатки не снижают положительного впечатления от работы. Считаю, что диссертационная работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к кандидатским диссертациям. 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».

Кандидат физико-математических наук, доцент

Заведующая лабораторией спектроскопии наноматериалов отдела светодиндуцированных поверхностных явлений Центра естественно-научных исследований Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН
119991, Москва, ул. Вавилова, д. 38.

Телефон, e-mail: +7 (499) 503-8206, elobr@kapella.gpi.ru

Дата 31.05.2019 / Образцова Елена Дмитриевна /

Подпись Образцовой Е.Д. заверяю

Зам. Директора ИОФ РАН

/Глушков В.В./

