

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Вергелеса Павла Сергеевича «Исследование методами растровой электронной микроскопии пленок и гетероструктур на основе нитрида галлия», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

В настоящей работе исследовались структуры на основе InGaN/GaN методами наведённого тока (НТ) и катодolumинесценции (КЛ). Актуальность темы определяется быстрым развитием промышленного применения нитридов III группы, фактически опережающем необходимые фундаментальные исследования. Это стимулирует интерес к изучению электрических и оптических свойств этих материалов. До сих пор остаются мало исследованными такие свойства III нитридов, как механизмы безызлучательной рекомбинации, стабильность оптических свойств при электронном и/или фотонном возбуждении, поведение протяженных дефектов и их влияние на квантовую эффективность и деградацию таких структур. Крайне важна информация о структуре дефектов и их эволюции при различных процедурах, об электронных и оптических переходах в таких объектах.

Большая часть экспериментальной работы и обработка полученных экспериментальных данных проведена автором лично. Вклад автора в работах, выполненных в соавторстве, заключается в непосредственном участии на всех этапах работы от постановки задачи до обсуждения результатов. Автору принадлежит анализ существующих литературных данных, реализация основных экспериментальных подходов, интерпретации, обобщения и анализ полученных результатов при использовании обсуждаемых в работе методов, формулировки основных положений.

Поскольку структуры на основе на основе системы множественных квантовых ям InGaN/GaN и пленок GaN получают все более широкое применение в микроэлектронике, Для практического применения важно решить

такие вопросы, как механизмы безызлучательной рекомбинации и деградации, стабильность оптических свойств при электронном и/или фотонном возбуждении, поведение протяженных дефектов и их влияние на квантовую эффективность и деградацию, а также эволюцию структуры дефектов при различных воздействиях, то **актуальность** темы диссертации не вызывает сомнения.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка работ, опубликованных по теме диссертации, и списка использованной литературы из 136 наименований. Диссертация изложена на 140 страницах машинописного текста, включая 54 рисунка и 3 таблицы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, показана новизна полученных результатов, изложены положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор литературы и сформулирована постановка задачи.

Вторая глава посвящена описанию исследуемых структур: пленок GaN, голубых светодиодов с множественными квантовыми ямами на основе системы InGaN/GaN, латерально зарощенных пленок GaN, а также структур со светодиодными наностолбиками. Также представлены методики и приборы, применявшиеся в ходе выполнения работы.

В третьей главе приведены результаты исследования методом наведенного тока MOCVD и ELOG пленок GaN. Впервые были проведены измерения локальных параметров латерально разросшихся пленок GaN: диффузионной длины неосновных носителей заряда и эффективной концентрации доноров. Было показано, что уровень легирования в областях вертикального роста не менее, чем в 3 раза превышает уровень легирования в латерально разросшихся областях пленки.

В четвертой главе представлены результаты исследования методом наведенного тока светоизлучающих структур с системой множественных квантовых ям InGaN/GaN с различным их числом (от 1 до 5 квантовых ям). Показано, что в светоизлучающих структурах с малым числом КЯ квантовые

ямы практически не влияют на эффективность собирания носителей заряда, в то время как для структур с 5 квантовыми ямами необходимо вводить поправочный коэффициент k , меньший единицы, количественно характеризующий эффективность рекомбинации неосновных носителей заряда в квантовых ямах.

Пятая глава посвящена результатам исследования влияния облучения электронным пучком низкой энергии на электрические и оптические свойства пленок GaN и светоизлучающих структур на его основе. Был предложен механизм влияния облучения низкоэнергетичным электрическим пучком на светоизлучающие структуры с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN – релаксация напряжений в кристаллической решетке структуры в активном слое, приводящая к ослаблению встроенного пьезополя и, соответственно, квантово-размерного эффекта Штарка.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Диссертация Вергелеса П.С. отличается высоким **уровнем новизны**.

1. Впервые измерены локальные электрические характеристики в отдельных областях латерально зарощенных пленок на основе нитрида галлия. Установлено, что эффективные концентрации доноров в областях вертикального и латерального роста ELOG пленок различаются не менее, чем в 3 раза, что качественно характеризует вероятность встраиваемости легирующей примеси в различных плоскостях роста.

2. Проведены измерения локальных значений диффузионной длины неосновных носителей заряда и эффективной концентрации доноров в голубых светоизлучающих структурах на основе множественных квантовых ям InGaN/GaN на областях размером порядка 1 мкм.

3. Установлено, что измерения методом наведенного тока позволяют оценить параметр, характеризующий вероятность рекомбинации носителей заряда в активном слое светодиодов. Показано, что на светодиодах с высокой эффективностью метод НТ позволяет визуализировать каналы утечек тока или

повышенного транспорта неосновных носителей заряда через активный слой структуры в виде дефектов, дающих светлый контраст.

4. Впервые показано, что при воздействии облучения низкоэнергетичным электронным пучком на светоизлучающие структуры с множественными квантовыми ямами на основе InGaN/GaN в спектрах излучения квантовых ям возникают новые более интенсивные линии свечения, смещенные в синюю область относительно исходной линии излучения. При этом положение исходной линии излучения сохраняется, и ее интенсивность практически не меняется, что свидетельствует о локальном характере изменений, происходящих в активном слое структуры. Показано, что такие изменения вероятнее всего происходят вблизи структурных дефектов — проникающих дислокаций или их пучков. Предложен механизм влияния облучения электронным пучком на исследуемые структуры — релаксация при облучении напряжений, возникающих в активной области вследствие несоответствия параметров решеток слоев GaN и InGaN.

5. Обнаружено движение сегментов дислокаций при облучении в сканирующем электронном микроскопе низкоэнергетичным электронным пучком. Показано, что скольжение дислокаций может наблюдаться даже при очень низких уровнях возбуждения.

Практическая ценность полученных результатов не вызывает сомнения и обусловлена тем, что полученные результаты могут оказаться полезными при оптимизации параметров светоизлучающих структур или при разработке более эффективных лазерных структур на основе латерально зарощенных пленок GaN.

Для проведения исследований было привлечено несколько методов измерений. Анализ результатов выполнен в соответствии с современными представлениями физики твердого тела и физики полупроводников. Все сделанные в работе выводы логичны и последовательно вытекают из результатов исследований. Представленные результаты докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях и опубликованы в

виде статей в рецензируемых российских и международных журналах. Поэтому **достоверность** полученных результатов и **обоснованность** выводов не вызывает сомнения.

К сожалению, диссертационная работа Вергелеса П.С. не лишена недостатков. Так в гл.5 разложение спектра на Гауссовы кривые используется для количественной характеристики получаемых спектров, хотя обоснованность такого подхода нуждается в дополнительных доказательствах. Кроме того, изменение спектров под действием облучения как правило объясняется возможностью релаксации напряжений в структурах с множественными квантовыми ямами. Поскольку этот вывод весьма существенен для практического использования, было бы полезно провести прямые измерения такой релаксации.

Диссертация Вергелеса Павла Сергеевича полностью удовлетворяет всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Не смотря на указанные недостатки, диссертация Вергелеса П.С. «Исследование методами растровой электронной микроскопии пленок и гетероструктур на основе нитрида галлия» является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне и обладающей несомненной новизной и практической полезностью полученных результатов. Диссертация обладает внутренним единством, написана грамотно и доходчиво. Кроме того, в ней содержатся новые и практически значимые положения, апробированные на многочисленных научных конференциях. Основные результаты исследования достаточно полно изложены в двадцати

шести статьях, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК. Автореферат адекватно описывает содержание диссертационной работы.

Официальный оппонент:

Ведущий научный сотрудник

лаборатории ЛСДС, д-р физ.- мат. наук,

01.04.07 – физика конденсированного состояния

Штейнман Э. А. «24» мая 2017 г.

e-mail: steinman@issp.ac.ru

Тел: +7-49652-28344

Адрес: 142432, Россия, Московская обл., ул. Ак. Осипьяна, д. 2

Подпись Штейнмана Э.А. удостоверяю

Ученый секретарь ИФТТ РАН

Г.Е.Абросимова

