

УТВЕРЖДАЮ

Проректор МГУ имени М.В. Ломоносова

доктор ф.-м. наук, проф.

Федянин А.А.

«15» мая 2017 г.



ОТЗЫВ

Ведущей организации 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 нано- электроника, приборы на квантовых эффектах.

Актуальность и значимость результатов для развития соответствующем отрасли науки

1. Актуальность темы диссертации

В настоящее время GaN и трехкомпонентные твердые растворы на его основе занимают одно из ведущих мест по применению в микроэлектронике. Гетероструктуры, квантовые ямы, квантовые точки, сверхрешетки на основе GaN содержатся в современных светоизлучающих диодах, лазерных диодах и фотоприемниках, работающих в диапазоне от видимого света до ультрафиолета. Гетеропереходы и сверхрешетки являются неотъемлемыми частями транзисторов с высокой подвижностью электронов, различных датчиков газа, биологических датчиков и других устройств.

Диссертационная работа Вергелеса П.С. посвящена исследованию в сканирующем электронном микроскопе методами наведенного тока и катодолюминесценции светодиодов на основе системы множественных квантовых ям InGaN/GaN и пленок GaN, изучению рекомбинационных свойств и роли протяженных дефектов в этих структурах, а также влияния облучения низкоэнергетичным пучком электронов на оптические и электрические характеристики светоизлучающих структур. В связи с этим, актуальность представленной диссертации не вызывает сомнений.

Научная новизна полученных результатов

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 пленок различаются не менее, чем в 3 раза, что качественно характеризует вероятность встраиваемости легирующей примеси в различных плоскостях роста. Подтверждено предположение о зависимости ширины изображений проникающих дислокаций в режиме наведенного тока как от величины диффузионной длины, так и от размера области пространственного заряда.

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 наведенного тока позволяет визуализировать каналы утечек тока или повышенного транспорта неосновных носителей заряда через активный слой структуры в виде дефектов, дающих светлый контраст.

4. Обнаружен и объяснен аномально медленный спад сигнала наведенного тока вне барьера Шоттки, наблюдаемый вблизи границы сращивания областей латерального роста пленок нитрида галлия. Установлено, что увеличение концентрации легирования Si устраняет этот эффект. Показано, что граница сращивания встречных фронтов роста является заряженным протяженным дефектом.

5. 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.

6. 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.

Научная значимость и достоверность полученных результатов

Предложенные методы измерения основных электрических характеристик голубых светодиодов, оценка на их основе вероятности рекомбинации носителей заряда в активном слое светоизлучающих структур, а также обнаруженная в режиме наведенного тока визуализация каналов утечек носителей заряда могут найти применение (оказаться полезными) при оптимизации параметров светоизлучающих структур. Разработанные методы измерения электрических характеристик отдельных областей в пленках GaN и полученные благодаря им результаты дают важную информацию, которую необходимо принимать во внимание при разработке более эффективных лазерных структур.

Методики исследования образцов и сами образцы подробно описаны в главе 2. 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.

Общая характеристика работы

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.

Первая глава содержит обзор литературы по теме диссертации, содержащей результаты по исследованию локальных свойств и свойств протяженных дефектов в пленках GaN и структурах на его основе методами растровой электронной микроскопии. Описаны

преимущества метода наведенного тока как одного из основных методов растровой электронной микроскопии, применяемых для определения локальных электрических параметров полупроводниковых материалов.

Во второй главе приведено описание 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.

Представлены методики, применявшиеся для изучения электрических и оптических свойств исследуемых образцов: измерение и моделирование зависимости спада наведенного тока от расстояния между точкой падения электронного пучка и краем коллектора, зависимости эффективности собирания неосновных носителей заряда от ускоряющего напряжения в случаях *p-n* перехода и барьера Шоттки. Для случая барьера Шоттки приведена методика измерения локальной эффективности собирания неосновных носителей заряда. Кратко описаны формирование контраста изображений в режиме наведенного тока и катодолюминесценции, расчет ширины области пространственного заряда коллектора и метод *C-V* измерений для определения концентрации легирующей примеси в полупроводниках. Далее приводятся описания используемых в работе приборов и параметров измерений.

В третьей главе приведены результаты исследования методом наведенного тока пленок GaN. Для исследуемых образцов с разной концентрацией легирующей примеси в режиме наведенного тока были измерены основные электрические характеристики: диффузионная длина и ширина области пространственного заряда. Впервые были проведены измерения локальных параметров латерально зарощенных 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). На основе измерения и моделирования зависимостей эффективности собирания для светодиодов были получены значения диффузионной длины неосновных носителей заряда и ширины области пространственного заряда. Показано, что в светоизлучающих структурах с малым числом квантовых ям они 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.

В пятой главе приведены результаты исследований 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. При исследовании методом наведенного тока влияния облучения электронным пучком на тонкие (толщина слоя над маской 6 мкм) пленки GaN было обнаружено скольжение проникающих дислокаций, а именно их сегментов, лежащих в базисной плоскости. При этом большая часть дислокаций остается неподвижной, а смещение сегментов дислокаций происходит на малые расстояния из-за наличия большого количества стопоров, таких как, например, проникающие дислокации. Была оценена скорость скольжения. Обнаружено, что дислокации могут двигаться в призматических плоскостях.

Замечания по работе

По работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. Недосмотры при оформлении диссертационной работы: на стр. 75 помещён рис. 28, а подпись к нему – на стр. 76; на стр. 90 по оси ординат не указана размерность.
2. Не указана точность (погрешность) измерений значений N_d и L_d структур, приводимых в таблице 3 и рис. 19.
3. В пункте 4.3 исследован механизм формирования светлого контраста в режиме НТ. Для более полного понимания природы контраста следовало бы провести исследования при определённых сочетаниях E_0 и I_b . Судя по рис. 28 и 29 при определённом выборе этих значений возможна инверсия контраста изображения.
4. Если явление усиления сигнала катодолюминесценции в зависимости от дозы электронного облучения в работе убедительно объяснено, то спад в интенсивности, т.е. гашение, при больших дозах не нашёл должного объяснения. Вряд ли только явление углеводородной контаминации объясняет эффект затухания. Возможно,

при достижении определённой дозы электронного облучения образуются новые радиационно-стимулированные дефекты – центры безизлучательной рекомбинации.

Заключение

Диссертационная работа Вергелеса П.С. «Исследование методами растровой электронной микроскопии пленок и гетероструктур на основе нитрида галлия» прошла необходимую апробацию на всероссийских и международных конференциях, основные результаты опубликованы в ряде авторитетных реферируемых Российских и международных журналов, что подтверждает их достоверность. Диссертационная работа Вергелеса П.С. представляет собой оригинальное самостоятельное исследование, выполненное на высоком научном уровне, обладающее актуальностью, научной новизной и практической значимостью. Автореферат диссертации полностью соответствует содержанию работы.

Работа соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, в том числе критериям II раздела Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор Павел Сергеевич Вергелес заслуживает присвоения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нано-электроника, приборы на квантовых эффектах.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании кафедры Физической электроники Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова 10 апреля 2017 года, протокол № 9.

Адрес организации: Российская Федерация, 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, д. 1, стр. 2, Физический факультет

тел.: +7 495 939-16-82

Эл. почта: info@physics.msu.ru

Веб-сайт: <http://www.phys.msu.ru>

Зав. кафедрой Физической электроники

МГУ им. М.В. Ломоносова,

профессор, доктор физ.-мат. наук

Черныш В.С