

УТВЕРЖДАЮ

Зам. директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе
по научной работе док. физ. мат. наук

П.Н. Брунков

«21» ноября 2020 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе» Российской академии наук на диссертационную работу Зиновьева Романа Александровича «Исследование дефектов в GaN светодиодах» по специальности 01.04.10 – «Физика полупроводников», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Актуальность и значимость результатов для развития соответствующей отрасли науки

Светодиоды (СД) с множественными квантовыми ямами (МКЯ) GaN / InGaN являются основой эффективных источников света в спектральных диапазонах от желто-зеленого до ближнего УФ-диапазона с большой перспективой на доминирование на рынке светоизлучающих устройств. Однако на сегодняшний день присутствует большой ряд проблем, не позволяющий раскрыть весь потенциал нитрид галлиевых светодиодных структур.

Диссертационная работа Зиновьева Р.А. посвящена изучению роли глубоких центров в снижении эффективности современных InGaN/GaN светодиодов с множественными квантовыми ямами, а также процессов деградации. В связи с этим, актуальность представленной диссертации не вызывает сомнений.

Научная новизна полученных результатов

В работе получены новые результаты, среди которых можно выделить следующие:

- изучено влияние облучения электронами с энергией 6 МэВ при комнатной температуре на концентрацию нескомпенсированных доноров, диффузионную длину и спектры глубоких уровней нелегированного материала n-GaN, выращенного методом хлорид-гидридной газофазной эпитаксии;
- исследованы глубокие уровни в светодиодах с различным составом индия в квантовых ямах (КЯ) InGaN/GaN и сопоставлены с ловушками объемного материала GaN;

- выполнено сравнение спектров глубоких уровней и излучательных характеристик зеленых GaN/InGaN светодиодов с наностолбиками GaN и наночастицами SiO₂ со стандартно выращенными GaN/InGaN светодиодами;
- исследованы источники шума светодиодов ближнего ультрафиолета и обозначены основные механизмы деградации.

Практическая ценность полученных результатов

На основе результатов, полученных при выполнении работы:

- показано как стандартные методы исследования глубоких уровней, адаптированные для современных светодиодов, позволяют локализовать обнаруженные дефекты в структурах;
- показано как с помощью облучения можно находить зависимость между концентрациями дефектов и параметрами приборов;
- показана эффективность испытаний ускоренного старения в нахождении изменений шумовых характеристик, спектров глубоких уровней и ключевых параметров светоизлучающих структур при повышенных нагрузках.

Научная значимость и достоверность полученных результатов

Полученные в диссертации результаты представляют научный интерес и дают основание для дальнейших исследований влияния точечных дефектов на снижение эффективности InGaN/GaN светодиодов.

Достоверность результатов подтверждается использованием современных методов исследований: вольт-фарадного профилирования, низкочастотных шумов, релаксационной спектроскопии глубоких уровней, адмиттанс-спектроскопии, а также достаточной выборкой экспериментальных образцов и объёмом измерений, непротиворечивостью результатам проводившихся ранее исследований и современным представлениям физики полупроводниковых светодиодов.

Результаты диссертации могут быть использованы при разработке светодиодных и лазерных структур на основе нитрида галлия в НПО "Полус", ООО "Элма-Малахит" и других.

Общая характеристика работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, выводов, списка использованных источников. Объём работы составляет 147 страниц машинописного текста, включая 45 рисунков, 2 таблицы и список литературы из 107 наименований.

В первой главе представлен литературный обзор, посвященный рекомбинационным процессам в объемном нитриде галлия и в структурах с квантовыми ямами, а также теоретическим и экспериментальным исследованиям дефектов в данном материале. Обозначены основные

достижения и актуальные проблемы в области современных светодиодов, излучающих в зеленом, синем и ультрафиолетовом спектральных диапазонах.

Во второй главе приведено описание методов исследования светодиодных структур, включающих измерения вольт-фарадного профилирования, низкочастотных шумов, адмиттанс-спектроскопии, релаксационной спектроскопии глубоких уровней с электрической и оптической инжекцией. Показаны теоретические основы каждого метода, возможности и ограничения.

В третьей главе приведены результаты измерений глубоких уровней в нелегированном материале нитрида галлия. Установлены основные ловушки, контролирующие время жизни облученного образца. Показаны результаты исследований глубоких центров в светодиодах с различным содержанием индия в квантовых ямах. Основные электронные и дырочные ловушки, обнаруженные в светодиодных структурах, сопоставлены с объемным материалом.

В четвертой главе приведены результаты сравнения излучательных свойств стандартных зеленых InGaN светодиодов с множественными квантовыми ямами со светодиодами с наночастицами SiO₂. Показаны результаты испытаний светодиодов при длительных наработках в жестких условиях повышенных температур и токов инжекции. На основании изменений в шумовых характеристиках и спектрах глубоких уровней сделан вывод, что усиление избыточных токов утечки связано с увеличением концентрации дырочных ловушек в квантовых ямах структур, а уменьшение внешней квантовой эффективности связано с увеличением электронных ловушек межузельного азота. Приведены результаты радиационных исследований зеленых, синих и УФ светодиодов. Показана взаимосвязь концентрации введенных дефектов с люминесцентными свойствами изучаемых структур.

Замечания по работе

По диссертационной работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. Название работы слишком обширное, в то время как содержание затрагивает преимущественно точечные дефекты.
2. Автор справедливо отмечает незаслуженное пренебрежение исследователями серьёзного влияния на эффективность светодиодов присутствия глубоких рекомбинационных центров и центров прилипания в активной МКЯ области. Но зато не пытается установить связь с другими очень важными факторами, такими как локализация носителей, возможная нерегулярность твёрдого раствора в КЯ, приводящая к появлению локальных областей с очень высокой концентрацией дефектов, влияния дефектов, связанных с дислокациями, таких как V-дефекты.
3. Гипотезы о механизмах, приводящих к деградации параметров светодиодов ближнего ультрафиолета в данной работе опираются на детальные исследования механизмов деградации в синих СД, выполненные ранее,

например, группой Н.М. Шмидт в ФТИ, которая является со-автором многих работ диссертанта. Однако освещение результатов этих исследований в литобзоре недостаточно, а интерпретация результатов по деградации СД ближнего ультрафиолетового диапазона в данной диссертации недостаточно увязана с предварительными наработками, хотя такая увязка проведена в самих статьях диссертанта.

4. Подтверждение того факта, что уровни дефектов в КЯ GaN/InGaN привязаны к уровню вакуума, является важным, хотя и не неожиданным результатом работы. Для практических приложений, однако, важно то, какие из обнаруженных дефектов серьёзно влияют на эффективность люминесценции. В этом смысле результаты для зелёных светодиодов, где главной электронной ловушкой являются центры $E_c-0,27$ эВ не слишком полезны, поскольку эта ловушка слишком мелкая, чтобы служить эффективным центром безызлучательной рекомбинации. При облучении таких СД главную роль играют более глубокие центры, но где они в исходных образцах? Ведь мы знаем, что эффективность зелёных СД значительно ниже, чем в синих?

5. В данной работе, в качестве обоснований принадлежности тех или иных глубоких уровней к соответствующим дефектам, являются только ссылки на результаты теоретических расчётов и исследования природы центров в нитриде галлия.

6. Недостаточно подробно описана методика определения плотности проникающих дислокаций в светодиодных структурах. С одной стороны, при расчете по общепринятым формулам для полуширин рентгеновских кривых качания, значение равное $280''$ соответствует плотности дислокаций более $1 \times 10^8 \text{ см}^{-2}$. С другой стороны, прямой расчет плотности дислокаций из ширины рентгеновских кривых качания малоинформативен для структур с латеральным заращиванием.

7. Можно придаться к точности формулировки на странице 17 «Когда толщина эпитаксиального слоя превышает определенную критическую величину, запасенная энергия деформации в системе уменьшается путем образования дислокаций, пронизывающих вдоль материала, от границы раздела к поверхности (пронизывающие дислокации), и прорастающих вдоль границы раздела материала (дислокации несоответствия), как показано на рисунке 1». Строго говоря, пронизывающие дислокации сами по себе энергию деформации не снижают. Деформация приводит к появлению дислокаций несоответствия, а они приводят к образованию проникающих дислокаций. Также следовало бы упомянуть другую причину возникновения дислокаций, а именно островковый рост и слияние островков в сплошную эпитаксиальную пленку.

8. Незначительные замечания к точности использования терминов. Словосочетание «большие микросхемы» (стр. 32) следовало бы заменить на «светодиодные структуры большого латерального размера» или «большие светодиодные чипы». С другой стороны, вместо кальки с английского «путем добавления термина $f(n)$ » (стр. 36) лучше написать «добавления члена $f(n)$ ».

9. Опечатка на странице 114, написано «облучением $\text{Cu K}\alpha$ при $\alpha = 41,5418 \text{ \AA}$ ». Очевидно, следует читать «облучением $\text{Cu K}\alpha$ при $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ ».

Заключение

Диссертационная работа Зиновьева Р.А. представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу. Постановка задач исследования, методики их реализации, полученные результаты изложены с достаточной степенью подробности. Диссертация написана понятным языком, стиль изложения в целом ясный.

Несмотря на отмеченные недостатки, диссертационная работа Зиновьева Р.А. производит положительное впечатление и является завершённым научным исследованием. Тема работы полностью соответствует паспорту научной специальности, а результаты диссертации имеют важное научное и практическое значение.

Представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» в Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС», а ее автор, Зиновьев Роман Александрович, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – «Физика полупроводников».

Доклад по диссертационной работе и отзыв заслушаны и обсуждены в лаборатории Физики профилированных кристаллов ФТИ им. А.Ф. Иоффе 29 апреля 2020 года, протокол № 2.

Адрес организации: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

Тел.: +7 (812) 297-2245

Эл. почта: post@mail.ioffe.ru

Веб-сайт: www.ioffe.ru

Заведующий лабораторией Физики
профилированных кристаллов Федерального
государственного бюджетного учреждения
науки Физико-технического института им.
А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
кандидат физико-математических наук



В.И. Николаев