

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **Томашевича Александра Александровича «Процессы дефектообразования в гетероструктуре GaN-светодиодов с множественными квантовыми ямами»**, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.5 – «Физическая электроника»

Актуальность тематики. Диссертационная работа А.А. Томашевича посвящена исследованию процессов дефектообразования и их роли в деградации гетероструктур на основе GaN. Не смотря на значительный прогресс в достижении эксплуатационных параметров светодиодных гетероструктур в последнее десятилетие и их широкое использование качестве источников света, процессы электрической деградации продолжают оставаться важной проблемой. Понимание процессов дефектообразования в гетероструктуре GaN-светодиодов и оценка как начальной дефектности структуры, так и динамики её изменения позволит более точно прогнозировать срок службы, выбирать электротепловой режим эксплуатации, а также совершенствовать технологию производства светодиодных источников света, что указывает на высокую актуальность темы диссертационного исследования.

Целью диссертационной работы является исследование механизмов дефектообразования в светодиодных гетероструктурах InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами (МКЯ) на основе изменений электрических и оптических характеристик туннельно-рекомбинационных явлений в процессе длительных испытаний. Для достижения этой цели была разработана экспериментальная установка и методики исследования процессов дефектообразования на основе анализа характеристик сверхслабого туннельно-рекомбинационного свечения (TPC) и связанных с ним токов в СИД на основе гетероструктур InGaN/GaN с МКЯ; проведены моделирование и оценка влияния локального перегрева протяженного дефекта при протекании токов большой плотности на процесс дефектообразования в гетероструктуре.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературных источников и трех приложений.

В **первой главе** представлен аналитический обзор известных механизмов деградации и методов исследования процессов дефектообразования в светодиодных гетероструктурах. Итогом первой главы является постановка задачи исследования.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальной установки, образцов и методики исследования, а также результатам экспериментального исследования картин туннельно-рекомбинационного свечения и динамики его изменения в процессе испытаний.

В **третьей главе** автор приводит результаты исследования изменения вольтамперных характеристик светодиодов в зависимости от режимов и времени испытаний.

В **четвертой главе** приведены аналитические оценки температуры локального перегрева в области протяженных дефектов и их кластеров на основе предложенной модели, а также аналитическая оценка роли этого перегрева в дефектообразовании и сопоставление результатов расчетов с экспериментальными исследованиями.

В ходе выполнения диссертационного исследования получены **новые и значимые для науки и техники результаты**, из которых хотелось бы отметить следующее:

1. В СИД на основе гетероструктуры InGaN/GaN с МКЯ в диапазоне токов $(0,07-20) \cdot 10^{-6}$ А и при напряжениях менее 2,3 В обнаружено сверхслабое свечение с неоднородной интенсивностью и цветностью по площади поверхности гетероструктуры являющегося по своей природе туннельно-рекомбинационным, а, значит, структурно-чувствительным.

2. Впервые предложено использовать цифровые фотографии сверхслабого туннельно-рекомбинационного свечения и разработанное ПО для выявления планарного распределения дефектов, обусловленных недостатками технологии изготовления гетероструктуры СИД и динамикой деградационных процессов во время испытаний.

3. Расчеты температуры перегрева локальных участков активной области СИД и термомеханических напряжений, возникающих при таких перегревах во время испытаний, недостаточны для генерации новых дислокаций, но достаточны для движения уже имеющихся в структуре дефектов. Движение множества дислокаций, находящихся в области локального перегрева, приводит к формированию кластеров линейных дефектов и возникновению новых областей предпочтительного зарядопереноса и локального перегрева. Этот механизм в конечном итоге и приводит к выходу из строя СИД.

Практическая значимость результатов работы очевидна, и она заключается в разработке автором методики измерения, позволяющей на основании анализа характеристик туннельно-рекомбинационного свечения выявлять распределение (картографирование) флуктуации стехиометрического состава, возникающей при росте эпитаксиальных пленок, а также планарное распределение и размеры скоплений дефектов структуры кристаллов СИД, необходимые для уточнения электротепловых моделей и входного контроля качества светодиодов.

Практическая значимость определяет **рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**. Результаты работы представляют ценность для разработки эффективных методов диагностики гетероструктур используемых в фотонике, микро- и нанoeлектронике, В настоящее время результаты диссертационного исследования внедрены на предприятие АО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов». Потенциально результаты могут быть использованы на предприятиях: АО Зеленоградский нанотехнологический центр, АО «Экран-оптические системы», группа компаний «Ангстрем»; в научных учреждениях: Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе.

Немаловажным является использование результатов диссертационного исследования в образовательном процессе по курсу «Методы диагностики полупроводниковых структур» и в научно-исследовательской работе студентов

(НИРС) ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

Полученные в работе **результаты являются новыми и достоверными, выводы и защищаемые положения обоснованы.** Достоверность подтверждается использованием современных экспериментальных и аналитических методов исследования, воспроизводимостью и согласованностью полученных результатов с современными представлениями о физических процессах деградации и дефектообразования в светодиодных InGaN/GaN-гетероструктурах.

Защищаемые положения базируются на результатах физического и математического моделирования, сопоставлении теоретических моделей с экспериментальными данными, выводы подтверждены детальным обсуждением с привлечением независимых литературных данных.

По работе имеются следующие замечания:

1. Из текста диссертации не ясно, что автор понимает под «сплошной составляющей», «точечной составляющей» свечения. Как аппаратно или аналитически разделяются эти составляющие?

2. В п.2.2 говорится, что фотографии свечения гетероструктур были получены при экспозициях от нескольких секунд до десятков минут. При этом нет комментариев по результатам, представленным на рисунке 2.3, одинаковые или разные экспозиции использовались при регистрации изображений.

3. В работе нет достаточного обоснования утверждения автора о связи увеличения сплошной составляющей зеленого цвета с начальной стадией деградиационных явлений.

4. Изменение красной составляющей в изображении свечения гетероструктур не обсуждается автором. В процентном соотношении наблюдается спад красной составляющей при росте зеленой. Этот факт требует осмысления.

5. В тексте диссертации нет некоторых ссылок на статьи диссертанта, опубликованные по теме диссертации и указанные в автореферате, например: Изучение деградации в светодиодных гетероструктур методом измерения ВАХ в области микротоков / Д. В. Богатырева, Н. В. Сапегина, М. А. Тимохина, А. А.

Томашевич // Материалы Всерос. науч.-техн. конф. «Научная сессия ТУСУР-2011». – Томск : В-Спектр. – 2011. – Ч. 1. – С. 150–152; Исследование электрооптических характеристик туннельной электролюминесценции светодиодов средней мощности / Н. К. Афанасьев, А. А. Томашевич // Сб. избранных ст. науч. сес. ТУСУР. – 2018. – Т. 1, № 2. – С. 13–16 и др.

6. Автор утверждает, что за 1280 часов испытаний и кратковременный термотокковый стресс светодиодов привели лишь к начальной стадии деградации, которая не приводит к существенному уменьшению яркости светодиода в рабочем режиме светодиода. Однако, данных, подтверждающих данный факт, не приводится в работе. Кроме того, ссылка на интернет-источник [7] с авторством Годовицына И.В. в контексте данного утверждения приведена явно ошибочно.

7. В работе часто встречаются «относительные» формулировки при сравнении величин, характеристик, например: «гораздо более слабой интенсивности» (стр.57), «значительно слабее по интенсивности» (стр. 58), «к значительному уменьшению яркости» (стр. 67), «существенные нестабильности тока» (стр.76) и др., что вносит некоторую неопределённость в обсуждение и понимание процессов.

Перечисленные замечания не снижают общую высокую оценку работы, носят рекомендательный характер для дальнейшего развития тематики исследования. Результаты диссертационного исследования прошли необходимую апробацию, были представлены на международных и всероссийских научных конференциях. Основное содержание работы опубликовано в трех журналах, включенных в перечень ВАК, в двух изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus.

Тематика диссертационной работы и её содержание соответствует специальности 1.3.5 - «Физическая электроника». Направление исследований соответствует п.5 паспорта специальности: Физические явления в твердотельных микро- и нано-структурах, молекулярных структурах и кластерах; проводящих, полупроводниковых и тонких диэлектрических пленках и покрытиях.

Автореферат соответствует содержанию и структуре диссертации, адекватно отражает полученные в работе результаты.

Таким образом, совокупность представленных научных результатов позволяет сделать заключение, что диссертация Томашевича А.А. «Процессы дефектообразования в гетероструктуре GaN-светодиодов с множественными квантовыми ямами», является законченной научно-квалификационной работой, выполненной в рамках актуального направления электроники, фотоники и приборостроения. Полученные результаты в должной степени обоснованы, имеют высокую научную и практическую значимость.

Диссертация соответствует специальности 1.3.5 – «Физическая электроника». Диссертация удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям (п. 9-11, 13. 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г.), а ее автор, Томашевич Александр Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.5 – «Физическая электроника».

Официальный оппонент – профессор
отделения материаловедения Инженерной
школы новых производственных
технологий, ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский Томский
политехнический университет», доктор
физико-математических наук по
специальности 01.04.07 «Физика
конденсированного состояния»

Полисадова Елена Федоровна

08.12.2023

Полисадова Елена Федоровна,
ФГАОУ ВО НИ ТПУ, ИШНПТ, ОМ

E-mail: elp@tpu.ru,

Тел: 8(3822)606310

Адрес организации: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 30

Подпись Полисадовой Елены Федоровны заверяю

Ученый секретарь ТПУ

Е.А. Кулинич

