



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и инновациям
кандидат технических наук, доцент

А. Г. Лоцилов

«11» октября 2023 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Томский государственный университет систем
управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

Диссертация «Процессы дефектообразования в гетероструктуре GaN-светодиодов с множественными квантовыми ямами» выполнена в ТУСУРе на кафедре конструирования и деталей радиоэлектронной аппаратуры (КУДР).

Соискатель Томашевич Александр Александрович в период подготовки диссертации являлся аспирантом ТУСУРа.

Научный руководитель – Еханин Сергей Георгиевич, д. ф.-м. н., доцент, профессор каф. КУДР.

По итогам обсуждения принято следующее заключение.

Оценка выполненной соискателем работы

Диссертация Томашевича А.А. является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задач, имеющее важное значение для технических наук в области физической электроники, а именно – исследование электрооптических характеристик и процессов дефектообразования в светодиодных гетероструктурах на основе нитрида галлия с множественными квантовыми ямами. Результаты данной диссертационной работы могут быть взяты за основу в дальнейших исследованиях и разработке методик диагностики полупроводниковых гетероструктур, что позволит обеспечить высокое качество современной радиоэлектронной аппаратуры.

Актуальность темы и направленность исследования

Перспективными материалами для создания сверхъярких источников света являются структуры на основе полупроводниковых нитридов. Их особенностью является продолжительный срок эксплуатации по сравнению с традиционными лампами. Особую актуальность приобрел вопрос повышения эффективности светодиодов, в том числе путем их эксплуатации при плотностях тока, превышающих номинальные значения, тем самым увеличивая яркость свечения. Деградационные явления в структуре светоизлучающих диодов (СИД), которые даже при номинальных условиях эксплуатации со временем ухудшают рабочие характеристики светодиодов, а при увеличении рабочих токов значительно

сокращают срок службы приборов на их основе. Многими исследователями рассмотрены различные механизмы деградации и ухудшения характеристик светодиодных структур со временем эксплуатации, однако роль в деградации протяженных и точечных дефектов, неоднородность инжекции, локальный перегрев активной зоны, а также туннельных процессов, представляющих основу для чувствительных методов диагностики, освещена не полностью, что определяет актуальность исследования механизмов деградации структуры.

Наиболее эффективным способом контроля нарастания концентрации точечных и линейных дефектов в светодиодных гетероструктурах с одной квантовой ямой (КЯ) являются спектры свечения, возникающего при туннельно-рекомбинационных явлениях, наблюдаемых в этих структурах при малых напряжениях и токах, когда р-п – переход еще практически закрыт и все внешнее электрическое напряжение приложено к активной области. Однако в структурах с множественными квантовыми ямами (МКЯ) интенсивность такого свечения крайне мала (на 4-5 порядков меньше, чем в структурах с одной КЯ), но из-за высокой структурной чувствительности к процессам дефектообразования представляет большой интерес для исследования.

Результат таких исследований предоставит возможность диагностики и контроля качества структуры на ранних стадиях деградации и в процессе испытаний, а также возможность определения предельных характеристик приборов, что позволит устанавливать оптимальные эксплуатационные параметры для требуемого режима работы и срока эксплуатации.

Личное участие автора в получении результатов

Диссертация является итогом многолетних исследований автора, проводившихся совместно с сотрудниками и студентами каф. КУДР ТУСУРа. Вклад автора состоит в обсуждении и постановке задач исследования, в планировании экспериментов, в анализе результатов экспериментов и испытаний, формулировке выводов и основных положений. Все результаты получены автором лично или совместно с соавторами при его непосредственном участии. Общее научное руководство работой осуществлялось профессором кафедры КУДР, доктором физико-математических наук Еханиным С.Г.

Степень достоверности результатов работы

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием современных экспериментальных и аналитических методов исследования, воспроизводимостью и согласованностью полученных результатов с современными представлениями о физических процессах деградации и дефектообразования в светоизлучающих диодах на основе гетероструктур InGaN/GaN.

Научная новизна диссертации

Подтверждена туннельно-рекомбинационная природа сверхслабого свечения, имеющего сплошную и точечную составляющие и наблюдающегося в диапазоне нано- и микротоков в светодиодных гетероструктурах с множественными квантовыми ямами на основе InGaN/GaN. Планарное распределение этого свечения коррелирует с текущим состоянием дефектности, дизайна и архитектуры СИД.

Проведенные теоретические оценки локального перегрева активной области и возникающие в этих условиях термомеханических напряжений позволили уточнить физическую картину процессов дефектообразования, в которой основная роль в деградации GaN - гетероструктур отводится описанию развития от времени испытаний модели линейного дефекта на основе дислокационного шунта. При этом в дислокационном шунте реализуется многопрыжковое туннелирование носителей заряда вдоль дислокационной линии, пронизывающей область объемного заряда p-n-перехода.

Практическая значимость работы

Разработана методика, основанная на анализе цифровых фотографий туннельно-рекомбинационного свечения и картин фотолюминесценции (при ультрафиолетовой подсветке), позволяющая выявлять распределение (картографирование) флуктуации концентрации индия, 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 СИД.

Результаты данной диссертационной работы планируются использовать в АО «НИИПП», г. Томск в качестве основы в дальнейших исследованиях и разработке методик ранней диагностики деградации параметров СИД с учетом тех явлений, которые были приведены в защищаемых положениях.

Ценность научных работ автора и полнота изложения материалов диссертации в опубликованных работах

Основные результаты исследований изложены в 21 публикации. Среди них 3 статьи опубликованы в рецензируемых журналах, 2 работы в журналах индексируемых реферативными базами данных Web of Science и Scopus, 15 работ в материалах всероссийских и международных конференций, а также свидетельство о регистрации программы ЭВМ.

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. Еханин С. Г. Оценка локального перегрева в гетероструктуре светоизлучающего диода на основе GaN / С. Г. Еханин, М. Н. Романовский, А. А. Томашевич // Доклады ТУСУР. – 2012. – № 2(26). – Ч. 1. – С. 57–60. DOI: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-23-25

2. Еханин С. Г. Исследование роли термопластических явлений в механизме деградации полупроводниковых гетероструктур на основе GaN / С. Г. Еханин, А. А. Томашевич // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 4. – С. 23–25. DOI: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-23-25

3. Еханин С. Г., Томашевич А. А. (2021) Сверхслабое свечение и нестабильности микротоков в синих GaN-светодиодах при разных стадиях деградации // Журнал «Прикладная физика». – 2021. – №6. – С.74 – 80. DOI: 10.51368/1996-0948-2021-6-74-82

Доклады в трудах конференций, индексируемых в Web of Science, Scopus

1. Test and measurement complex for investigation of GaN based high-brightness light-emitting diodes / S. Ekhanin, A. Tomashevich, A. Ermolaev, A. Loschilov // 2016 International Siberian Conference on Control and

Communications, SIBCON 2016 - Proceedings 2016. P. 7491776. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491776

2. Appraisal of role of thermoplastic deformation in degradation process of GaN-based semiconductor heterostructures / A. Tomashevich, S. Ekhanin, I. Yunusov / AIP Conference Proceedings of the XIV International Conference of Students and Young Scientists. 2017. P. 060005. DOI: 10.1063/1.5009876

Публикации в иных сборниках и журналах

1. О схожести явлений электрической деградации в диэлектриках и широкозонных полупроводниках / С.Г. Еханин, Н.С. Несмелов, Л.Ю. Солдатова, Томашевич А.А., // Материалы Двенадцатой международной конференции «ФИЗИКА ДИЭЛЕКТРИКОВ» (ДИЭЛЕКТРИКИ-2011), С.-Петербург. Май-июнь 2011г.

2. Изучение деградации в светодиодных гетероструктур методом измерения ВАХ в области микротоков / Д.В. Богатырева, Н.В. Сапегина, М.А. Тимохина, А.А. Томашевич // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Научная сессия ТУСУР 2011». – Томск: В-Спектр. – 2011. – Ч. 1. – С. 150-152.

3. Установка для определения типов, концентрации и распределения дефектов структуры кристаллов светодиодов / Д.В. Богатырева, Н.В. Сапегина, М.А. Тимохина, А.А. Томашевич // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Научная сессия ТУСУР 2012». – Томск: В-Спектр. – 2012. – Ч. 1. – С. 121-123.

4. Зависимость вольтамперных характеристик СИД от температуры / А.В. Ермолаев, И.С. Тен, Д.В. Богатырева, Н.В. Сапегина, А.А. Коровкин, А.А. Томашевич // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Научная сессия ТУСУР 2012». – Томск: В-Спектр. – 2012. – Ч. 1. – С. 135-137.

5. Определение температуры активной зоны светодиодных гетероструктур / А.А. Томашевич, Д.П. Матвеев, А.П. Чехоненко, Д.В. Петенев // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Научная сессия ТУСУР 2013». – Томск: В-Спектр. – 2013. – Ч. 1. – С. 175-177.

6. Комплексные исследования деградации сверхъярких светодиодов при повышенных плотностях рабочего тока / А.А. Томашевич, А.В. Ермолаев, Д.В. Петенев // Материалы 53-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2015: Квантовая физика. 2016. С. 58.

7. Изменение температуры активной зоны светодиодов на основе GaN в зависимости от времени испытаний / С.Г. Еханин, А.А. Томашевич, С.Л. Аржаков, К.К. Слепцов // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2016. Т. 16. № 4. С. 131-133.

8. Влияние процесса дефектообразования на туннельную электролюминесценцию в сверхъярких светодиодах на основе нитрида галлия / А.А. Томашевич, А.В. Ермолаев, Д.В. Петенев, Е.С. Пушкарева // Материалы 54-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2016: Квантовая физика. 2016. С. 34.

9. Исследование кинетики дефектообразования в сверхъярких светодиодах на основе нитрида галлия при повышенных плотностях рабочего тока /

А.А. Томашевич, А.В. Ермолаев, Д.В. Петенев, Е.С. Пушкарева // Материалы 54-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2016: Квантовая физика Научный руководитель секции А.В. Латышев. 2016. С. 33.

10. Исследование изменений обратных вольтамперных характеристик светодиодов на основе нитрида галлия в зависимости от режимов и времени испытаний / А.А. Томашевич, С.Г. Еханин, С.Л. Аржаков, К.К. Слепцов // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. 2017. № 1-1. С. 172-175.

11. Изменение картин туннельной электролюминесценции светодиодов на основе нитрида галлия в зависимости от режимов и времени испытаний // А.А. Томашевич, С.Г. Еханин, К.К. Слепцов, С.Л. Аржаков // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. 2017. № 1-1. С. 156-159.

12. Исследование механизмов деградации полупроводниковых гетероструктур на основе нитрида галлия / А.А. Томашевич, С.Л. Аржаков, К.К. Слепцов // Перспективы развития фундаментальных наук. Сборник научных трудов XIV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 2017. С. 10

13. Исследование электрооптических характеристик туннельной электролюминесценции светодиодов средней мощности / Н.К. Афанасьев, А.А. Томашевич // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. 2018. Т. 1. № 2. С. 13-16.

14. Комплексное исследование процесса дефектообразования в кристаллах GaN-светодиодов средней мощности при длительных испытаниях / С.Г. Еханин, А.А. Томашевич, Н.К. Афанасьев // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. 2018. № 1-1. С. 94-97.

15. Афанасьев Н.К. Исследование электрических характеристик FLIP-CHIP светодиодов / Н.К. Афанасьев, А.А. Томашевич // Материалы XVII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», Россия, Томск, 21 – 24 апреля 2020г., С.21 – 23.

Соответствие содержания диссертации выбранной специальности

Выполненная работа соответствует паспорту специальности 1.3.5 – «Физическая электроника» (технические науки), относится к областям:

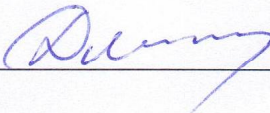
- твердотельная электроника, в том числе СВЧ-электроника, полупроводниковая электроника, акустоэлектроника, сверхпроводниковая электроника, спиновая электроника, оптоэлектроника, криоэлектроника (п.1.2 паспорта);
- практическое применение физических явлений в твердотельных микро- и нано-структурах, молекулярных структурах и кластерах; проводящих, полупроводниковых и тонких диэлектрических пленках, и покрытиях (п.2 паспорта).

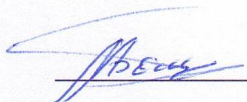
Диссертация «Процессы дефектообразования в гетероструктуре GaN-светодиодов с множественными квантовыми ямами» Томашевича Александра

Александровича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.5 – «Физическая электроника».

Заключение принято на заседании объединенного научно-технического семинара кафедры Конструирования и деталей радиоэлектронной аппаратуры (КУДР), Специального конструкторского бюро «Смена», кафедры радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга (РЭТЭМ), кафедры конструирования и производства РЭА (КИПР), кафедры физической электроники (ФЭ)

Присутствовало на заседании 15 чел., в том числе 4 д.т.н, 4 к.т.н, 2 к.ф.-м.н. и др. Результаты голосования «за» – 15 чел., «против» – нет, «воздержалось» – нет, протокол № от 10.10.2023 г.


Малютин Николай Дмитриевич
Председатель НТС
Профессор каф. КУДР


Бомбизов Александр Александрович
Секретарь НТС каф. КУДР,
начальник СКБ «Смена»