

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
ФГАОУ ВО НИУ МИЭТ,
д.т.н., профессор
Гаврилов С.А.



« 23 » 11 2023

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу 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»

В связи с дальнейшим стремительным развитием светодиодного освещения: светофоры, световая сигнализация, судовое, шахтное и аварийное освещение, декоративная подсветка зданий и других объектов, а также бытовое освещение жилых помещений – все более значимой проблемой является деградация первоначальных параметров светоизлучающих гетероструктур и светодиодов в целом. Наиболее значимым механизмом в деградиционных явлениях полупроводниковых гетероструктур является дефектообразование при протекании рабочих токов большой плотности. Поэтому актуальность темы данной диссертационной работы не вызывает сомнений. Актуальны и разработки новых методик оценки контроля потенциальной степени деградации характеристик и динамики их изменений в процессе наработки.

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.

В первой главе диссертации рассмотрены существующие методы исследования и диагностики процессов дефектообразования в полупроводниковых гетероструктурах. Проанализированы современные электрические, электролюминесцентные, фотоэлектрические методы и методы исследований структурных свойств активной области светодиодов. Проанализированы современные представления о механизмах деградации и динамики дефектообразования светодиодных гетероструктур в процессе испытаний, подчеркнуты достоинства и недостатки экспериментальных и расчетных методов, основанных на различных математических моделях.

Во второй главе диссертации приведены результаты исследования сверхслабого свечения, обнаруженного при протекании через активную область светодиодной гетероструктуры на основе InGaN/GaN в диапазоне нано- и микротоков. Исследование изменения цветовых оттенков картин свечения в зависимости от приложенного напряжения показало, что обнаруженное сверхслабое свечение имеет туннельно-рекомбинационную природу. С помощью разработанного программного обеспечения, позволяющего производить пиксельный анализ цифровых фотографий картин туннельно-рекомбинационного свечения, разработана методика визуализации распределения дефектов по площади кристалла светодиода и контроля динамики развития деградационных явлений. Представлены результаты исследования динамики изменения картин туннельно-рекомбинационного свечения от времени испытаний, отражающих кинетику дефектообразования.

В третьей главе диссертации приведены результаты экспериментальных исследований прямых и обратных ВАХ светодиодов, выполненных по различной технологии и с различным интерфейсом в зависимости от времени испытаний. Показано, что изменения на начальных участках прямой ветви ВАХ и обратные ветви ВАХ, обусловленные туннельно-рекомбинационными процессами, являются чувствительным инструментом, выявляющим динамику накопления дефектов в гетероструктуре.

В четвертой главе диссертации рассмотрены электротепловые и термопластические процессы в кристаллах светоизлучающих диодов. Используя модель изотропного токового шнура, проведен расчет температуры локального перегрева в области протяженного дефекта. Показано, что температура локального перегрева зависит от величины радиуса теплового шнура и плотности рабочего тока. При радиусе канала предпочтительного переноса равном 6-10 мкм и плотности тока 100-200 А/см² температура перегрева может превышать 100-150 градусов, что согласуется результатами экспериментальных исследований многих авторов.

Расчет термомеханических напряжений для нахождения поля деформаций вокруг теплового шнура показал, что возникающие при локальном перегреве деформации не могут приводить к возникновению новых дислокаций. Появление новых крупных дефектов, возникающих при испытаниях, как показано в экспериментах, вызвано движением имеющихся дислокаций. Поскольку такое движение может приводить к созданию кластеров дислокаций с радиусом более 6 мкм и вызывать новые источники перегревов.

В заключении представлена физическая картина развития процессов дефектообразования в зависимости от времени испытаний и обобщение полученных результатов.

Характеризуя **научную новизну работы**, выделим следующие основные результаты:

1. 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 отражает текущее состояние дефектности СИД с различными дизайном и архитектурой.

2. Установлено, что изменения начальных участков прямых и обратных ветвей ВАХ коррелирует с планарными изменениями туннельно-рекомбинационного свечения и отражает динамику дефектообразования в процессе испытаний.

3. 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 шнура. При этом в дислокационном шнуре реализуется многопрыжковое туннелирование носителей заряда вдоль дислокационной линии, пронизывающей область объемного заряда p-n-перехода.

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.

Основные результаты исследований опубликованы в 22 работах, из которых 3 статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 2 работы в материалах конференций, индексируемых реферативными базами данных Web of Science и Scopus, а также 17 работ в материалах всероссийских и международных конференций.

Положения, выносимые на защиту, полностью отражают научную новизну и практическую значимость диссертационного исследования.

Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы:

Полученные результаты обладают практической значимостью для оперативной оценки качества выращиваемых светоизлучающих структур и, на наш взгляд, могут быть использованы для оптимизации ростовых процессов предприятий, занимающихся разработкой и изготовлением вышеуказанных гетероструктур, например АО «Оптрон», АО «НПО «Орион», АО «Светлана-Рост».

Замечания по диссертационной работе:

1. Не уточнены условия проведения измерений картин туннельно-рекомбинационного свечения, используемых для картографирования распределения дефектности слоя СИД.

2. В разделе, посвященном исследованию начальных участков ВАХ, не проведена оценка погрешности измерений. Знание этих величин может оказаться важным при использовании и внедрении разработанных методов диагностики качества светодиодных гетероструктур на производстве.

3. Имеются погрешности в тексте диссертации, названиях и обозначениях на рисунках, например рис. 1.17 не соответствует название в тексте диссертации и подрисуночное, рис. 3.2, 3.7, 3.8 неправильное положение координатных осей. Некоторые рисунки разделов сложны для восприятия, например 1.27, 1.26.

Приведенные замечания не снижают общего положительного впечатления от диссертационной работы.

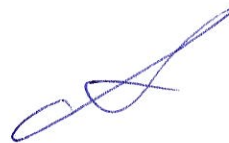
Диссертационная работа Томашевича Александра Александровича «Процессы дефектообразования в гетероструктуре GaN–светодиодов с множественными квантовыми ямами» имеет ясную логическую структуру, содержит рисунки, таблицы, и графики, поясняющие суть проведенного исследования. Автореферат диссертации правильно отражает основные результаты исследования и личный вклад автора. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

Диссертация Томашевича А.А. является законченным научным исследованием и соответствует критериям пункта 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (ред. от 28.08.2017), предъявляемых к кандидатским диссертациям, а её автор, Томашевич Александр Александрович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.3.5 – «Физическая электроника».

Материал диссертации и настоящий отзыв обсуждены и одобрены на заседании Института интегральной электроники Национального

исследовательского университета «МИЭТ» « 23 » ноября 2023 г., протокол № 4.

Директор Института ИнЭл,
д.т.н., доцент



Лосев В. В.

Отзыв составил:

Егоркин Владимир Ильич,
к.т.н., начальник научно-исследовательской лаборатории
«Элементная база нанoeлектроники»



Егоркин В.И.

Подписи Лосева В.В. и Егоркина В.И. заверяю
Ученый секретарь НИУ МИЭТ, к.т.н.



Козлов А.В.

МП « 23 » 11 2023 г.

Полное название организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники».

Адрес: 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1.

Телефон: (499) 731-44-41; Факс: (499) 710-22-33.

Электронная почта: netadm@miee.ru.