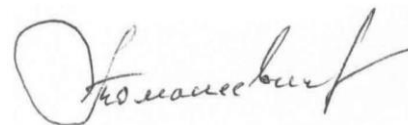


На правах рукописи



**Томашевич Александр Александрович**

**ПРОЦЕССЫ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ  
В ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ GaN-СВЕТОДИОДОВ  
С МНОЖЕСТВЕННЫМИ КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ**

Специальность 1.3.5 – «Физическая электроника»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Томск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР).

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук, профессор  
**Еханин Сергей Георгиевич**

**Официальные оппоненты:** **Брудный Валентин Натанович**  
Доктор физико-математических наук, ФГАОУ  
ВО «Национальный исследовательский  
Томский государственный университет»,  
г. Томск,  
Директор НОЦ «Наноэлектроника»

**Полисадова Елена Федоровна**  
Доктор физико-математических наук, ФГАОУ  
ВО «Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет»,  
г. Томск,  
Профессор отделения материаловедения  
ИШНПТ

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования «**Национальный  
исследовательский университет  
«Московский институт электронной  
техники»**», г. Москва, г. Зеленоград

Защита состоится «27» декабря 2023 г. в 09 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.145.03, созданного на базе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, по адресу 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа по адресу: 634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 146, и на официальном сайте: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/6icx7ddk>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
канд. техн. наук



А.В. Казаков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

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. Деграционные 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, а также туннельных процессов, представляющих основу для чувствительных методов диагностики, освещена не полностью, что определяет актуальность исследования механизмов деградации структуры.

Имеющиеся в литературе описания механизмов деградации мощных СИД показывают, что деградация СИД на основе GaN «сопровождается генерацией дефектов под действием инжекционного тока, электромиграцией ионов остаточных примесей и металлических ионов контактных площадок, а также увеличением плотности состояний на гетерограницах». При малых и средних плотностях тока протяженные дефекты структур не представляют значительных проблем, однако при больших плотностях могут приводить к катастрофическим разрушениям 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 *p-n*-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, а также

возможность определения предельных характеристик приборов, что позволит устанавливать оптимальные эксплуатационные параметры для требуемого режима работы и срока эксплуатации.

### **Цели и задачи работы**

Целью данной диссертационной работы является исследование механизмов дефектообразования в светодиодных гетероструктурах InGaN/GaN с МКЯ на основе анализа изменений электрических и оптических характеристик туннельно-рекомбинационных явлений в процессе испытаний.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи.

1. Изучение имеющихся в литературе данных о механизмах туннельно-рекомбинационных явлений в СИД с одной КЯ и с МКЯ;

2. Разработка экспериментальной установки и методик исследования характеристик сверхслабого туннельно-рекомбинационного свечения (ТРС) и связанных с ним токов в СИД на основе гетероструктур AlInGaN с МКЯ для анализа процессов дефектообразования на их основе.

3. Проведение исследования изменений вольтамперных характеристик (ВАХ) в диапазоне ( $10^{-12}$ – $10^{-3}$ ) А в зависимости от режимов и времени испытаний для выяснения механизмов дефектообразования и его роли в процессах деградации гетероструктуры СИД.

4. Моделирование и аналитическое исследование влияния локального перегрева при протекании токов большой плотности на процесс дефектообразования в гетероструктуре СИД и сопоставление результатов с экспериментальными исследованиями.

### **Научная новизна**

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 изменяющимся от приложенного напряжения спектром и неоднородной интенсивностью и цветностью по площади поверхности гетероструктуры являющегося по своей природе туннельно-рекомбинационным. Интенсивность и цветность данного свечения зависит от условий при которых осуществляются туннельно-рекомбинационные процессы: высокая напряженность электрического поля в активной области гетероструктуры, наличие хвостов состояний и уровней дефектов в запрещенных зонах КЯ, степень неоднородности концентрации индия по объему и площади кристалла.

2. Впервые предложено использовать цифровые фотографии сверхслабого ТРС и разработанное ПО для выявления планарного распределения концентрации точечных и линейных дефектов, для выявления

сегментированных квантовых ям, квантовых островков и квантовых точек внутри активных слоев, обусловленных недостатками технологии изготовления гетероструктуры СИД и динамикой деградационных процессов во время испытаний.

3. Установлено что в светоизлучающих диодах на основе гетероструктуры InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами изменение начальных участков прямых и обратных ветвей вольтамперной характеристики коррелирует с изменениями интенсивности и цветности туннельно-рекомбинационного свечения и отражает динамику деградационных явлений, происходящих в гетероструктуре в процессе испытаний.

4. Расчет зависимости температуры перегрева локальной области активной зоны СИД от величины радиуса области скопления линейных дефектов (по модели теплового шнура) и плотности рабочего тока показал, что величина температуры перегрева существенно зависит от размеров областей скопления линейных дефектов, пронизывающих активную область СИД. А термомеханические напряжения, возникающие при локальных перегревах гетероструктуры, недостаточны для генерации новых линейных дефектов, но достаточны для движения уже имеющихся в структуре дефектов. Эти движения приводят к формированию кластеров линейных и точечных дефектов и возникновению новых областей предпочтительного зарядопереноса и локального перегрева. Этот механизм в конечном итоге и приводит к выходу из строя СИД.

5. На основании полученных экспериментальных результатов и теоретических оценок сформирована физическая картина процессов, в которой основная роль в деградации GaN-гетероструктур отводится развитию от времени испытаний линейных дефектов на основе проводящих дислокационных шунтов, в которых реализуется прыжковое туннелирование носителей заряда вдоль дислокационных линий, пронизывающих гетероструктуру и область объемного заряда *p-n*-перехода.

### **Практическая значимость работы**

1. Разработана методика, позволяющая на основании анализа характеристик туннельно-рекомбинационного свечения (в виде планарного распределения точечных и сплошных составляющих) и картин фотолюминесценции (при ультрафиолетовой подсветке) 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.

2. Разработанное ПО позволяет произвести пиксельный анализ цифровых фотографий регистрируемого при токе в диапазоне ( $10^{-9}$ – $10^{-6}$ ) А туннельно-рекомбинационного свечения в автоматизированном режиме и, тем самым, проводить анализ изменений спектра слабых микроисточников от режимов и времени испытаний СИД. Это дает возможность проводить как входной контроль, так и отслеживать динамику процессов дефектообразования, что очень важно для совершенствования производственного процесса как светодиодных гетероструктур, так источников света на их основе.

3. С помощью использования прецизионной измерительной техники выявлены изменения на начальных участках ВАХ СИД в зависимости от режимов и времени испытаний на более ранней стадии, что может служить основой для создания более чувствительных методик ранней диагностики деградационных явлений.

Результаты данной диссертационной работы могут быть взяты за основу в дальнейших исследованиях и разработке методик ранней диагностики деградационных параметров СИД с учетом тех явлений, которые были приведены в защищаемых положениях.

### **Методы исследования**

При решении поставленных задач использовались прецизионная измерительная техника, высокочувствительные оптические системы с высоким разрешением и тепловизионные устройства, методы анализа полученных данных о свечении сверхмалой интенсивности в режиме длительной экспозиции фотосъемки, а также методы цифровой обработки фотографий планарного распределения цветовых оттенков туннельно-рекомбинационного свечения.

### **Научные положения, выносимые на защиту**

1. Установлено, что неоднородное по площади поверхности гетероструктуры сверхслабое свечение, обнаруженное в светоизлучающих диодах на основе гетероструктуры InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами при токе в диапазоне ( $10^{-9}$ – $10^{-6}$ ) А и при напряжении менее 2,3 В, является туннельно-рекомбинационным.

2. Разработана методика, основанная на анализе цифровых фотографий картин туннельно-рекомбинационного свечения светоизлучающего диода на основе гетероструктуры InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами, полученных при токе в диапазоне ( $10^{-9}$ – $10^{-6}$ ) А и напряжении менее 2,3 В, позволяющая визуально наблюдать картины планарного распределения интенсивности и цветовые оттенки сверхслабого туннельно-рекомбинационного свечения, а также анализировать локальные изменения его

спектральных характеристик, обусловленных дефектообразованием в процессе испытаний, с помощью пиксельного анализа цифровых фотографий.

3. Установлено, что в светоизлучающих диодах на основе гетероструктуры InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами изменение начальных участков прямых и обратных ветвей вольтамперных характеристик в диапазоне токов ( $10^{-12}$ – $10^{-6}$ ) А отражает динамику деградационных явлений, происходящих в гетероструктуре в процессе испытаний: влияние встроенных кристаллических полей и образующихся на гетерограницах электрических диполей, смещение ветвей вольтамперных характеристик в сторону меньших напряжений, релаксационные процессы при паузах в испытаниях и формирование локальных проколов активной области на конечной стадии.

4. На основании теплофизических расчетов было установлено, что возникающие вследствие протекания локальных токов с плотностью 150–200 А/см<sup>2</sup> локальные области потемнения на полученных изображениях светящейся поверхности светоизлучающего диода на основе гетероструктуры InGaN/GaN при токе в диапазоне ( $10^{-9}$ – $10^{-6}$ ) А после длительных испытаний соответствуют каналам безызлучательной рекомбинации, образовавшимся вдоль пучка линейных дефектов, причем при увеличении радиуса пучка линейных дефектов свыше 6–10 мкм его перегрев будет превышать 100–150 градусов, что соответствует критическому значению, при котором наступает катастрофическое изменение, приводящее к выходу из строя светоизлучающего диода, а механизм увеличения радиуса кластеров дислокаций обусловлен не генерацией новых дислокаций, а движением имеющихся.

### **Степень достоверности и апробация 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.

Результаты работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научно-технических конференциях: Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления» (2017–2019, Томск); Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР» (2018, Томск); AIP Conference Proceedings (2017) – Published by American Institute of Physics; Международной научно-технической конференции INTERMATIC-2016

(Москва); Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (2020, Томск).

Результаты диссертационной работы, внедрены на предприятия АО «Научно-исследовательского института полупроводниковых приборов», ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

### **Публикации**

Основные результаты исследований изложены в 22 публикациях. Среди них 3 статьи опубликованы в рецензируемых журналах, 2 работы в журналах, индексируемых реферативными базами данных Web of Science и Scopus, а также 17 работ в материалах всероссийских и международных конференций.

### **Личный вклад автора**

Вклад автора состоит в постановке задач исследования, в планировании и анализе результатов экспериментов, испытаний и расчетов, формулировке выводов и основных положений. Все результаты получены автором лично или совместно с соавторами при его непосредственном участии, и с научным руководителем. Научным руководителем оказана помощь в интерпретации результатов и разработке модели.

Общее научное руководство работой осуществлялось профессором кафедры КУДР, доктором физико-математических наук Еханиным С.Г.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из следующих разделов: введение, четыре главы основной части, заключение и список литературы. Объем диссертации составляет 128 страниц машинописного текста, включая 60 рисунков, 25 формул, 7 таблиц и список литературы из 103 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** представлена актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, отражены научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлен обзор научных работ по тематике исследования. Имеющиеся в мировой практике описания механизмов деградации мощных светоизлучающих диодов показывают, что неоднородности состава твердого раствора, точечные и линейные дефекты гетероструктуры являются основными причинами пространственной неоднородности оптических и электрофизических характеристик СИД. Несмотря на совершенствование технологий изготовления светоизлучающих InGaN/GaN гетероструктур эта проблема остается ключевой.



Прямые методы исследования дефектов светодиодных гетероструктур такие как просвечивающая и растровая электронная микроскопия, атомно-зондовая топография и другие – требуют специальной подготовки образцов и не применимы к корпусированным СИД. Существующие косвенные методы диагностики, как правило, основаны на измерении «интегральных» электрических и электрооптических характеристик светодиодов.

В этой связи для исследования деградационных явлений в светодиодных гетероструктурах актуальной является задача разработки способов и высокочувствительных средств измерения и методик оценки степени дефектности гетероструктуры по параметрам **пространственной неоднородности** статических и динамических характеристик электролюминесценции (ЭЛ).

Было отмечено, что такие характеристики, как ширина спектрального распределения, сдвиги максимума спектров после наработки, вольтамперные характеристики и т.д., несут в себе информацию о динамике деградационных явлений и дефектообразования в синих гетероструктурах на основе GaN.

Также в большинстве работ отмечается, что деградация оптической мощности InGaN/GaN-светодиодов имеет общую природу и сопровождается генерацией дефектов под действием инжекционного тока, электромиграцией ионов примесей и металлических ионов контактных площадок, а также увеличением плотности состояний на гетерограницах. Однако характер взаимосвязи деградации оптической мощности с изменением свойств дефектной системы остается невыясненным. Кроме того, по-прежнему остается предметом дискуссии вопрос о том, какие именно дефекты и в каких областях генерируются в процессе старения, а также каково участие системы протяженных дефектов в этом процессе.

Стоит отметить, что в литературных источниках информация о связи спектральных характеристик свечения в области микротоков, обусловленных туннельно-рекомбинационными механизмами с накоплением дефектов в процессе деградации, имеется лишь для светодиодов с одной КЯ.

Тем не менее, особенности туннельно-рекомбинационных механизмов протекания тока и свечения в СИД с МКЯ могли бы дать дополнительную информацию о деградационных явлениях в гетероструктурах сверхъярких светодиодов (в том числе для создания новых методов ранней диагностики).

Во **второй главе** приведено описание экспериментальной установки, образцов и методики исследования, а также результаты экспериментального исследования картин туннельно-рекомбинационного свечения при малых токах в зависимости от времени испытаний СИД.

Одним из эффективных методов контроля динамики накопления дефектов в гетероструктурах InGaN/GaN является определение спектра туннельно-рекомбинационного излучения при напряжениях прямого смещения менее 2,3 В и токах в диапазоне нано- и микроампер. С этой целью было проведено исследование картин свечения при малых рабочих токах. Однако регистрация сверхслабого свечения в области микро- и нанотоков оказалась сложной задачей, поскольку данное свечение имеет крайне слабую интенсивность, а согласно задачам требуется не просто исследовать оптические характеристики свечения СИД, а уловить мельчайшие изменения этих характеристик в зависимости от испытания, а также изменения, которые могут возникнуть в глубине и на поверхности кристалла. Для этого в экспериментальную установку необходимо было включить устройства оптической микроскопии с возможностью фиксации получаемых изображений сверхслабого свечения, как в обычном режиме, так и в режиме длительной экспозиции. Также немаловажным фактором работы СИД является тепловыделение, которое измерялось с помощью тепловизора для контроля температуры поверхности кристалла СИД.

Методика эксперимента заключалась в следующем: сначала измерялись ВАХ свежего СИД, производилось фотографирование картин сверхслабого туннельно-рекомбинационного свечения через микроскоп с использованием высокочувствительного режима фотографирования с длительной экспозицией, далее СИД ставился на испытания, как при номинальных токах, так и при завышенных токах (ускоренное испытание). После испытаний снова проводились измерения ВАХ, фотографирование и постановка на испытание, либо СИД оставляли в выключенном состоянии (релаксация), в зависимости от целей исследования, и цикл повторялся.

Фотографии данного свечения, которые представлены на рисунке 1, были получены при длительных экспозициях фотографирования от нескольких секунд до нескольких минут.

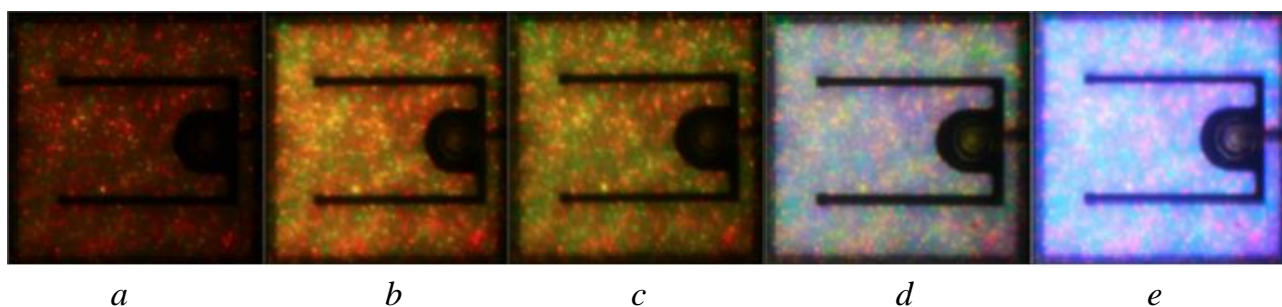


Рисунок 1 – Фотографии картин свечения СИД при длительной фотоэкспозиции в зависимости от напряжения/тока: *a* – 2,0 В / 70 нА; *b* – 2,1 В / 0,25 мкА; *c* – 2,2 В / 1 мкА; *d* – 2,3 В / 5 мкА; *e* – 2,4 В / 20 мкА

Как видно из рисунка 1 в свечении присутствует две компоненты: малозаметная сплошная и более яркая точечная. Для лучшего понимания происходящих процессов в гетероструктуре следует рассмотреть ее зонную диаграмму из работы Бочкаревой и др. [1\*], которая подходит для описания данных процессов, как показано на рисунке 2.

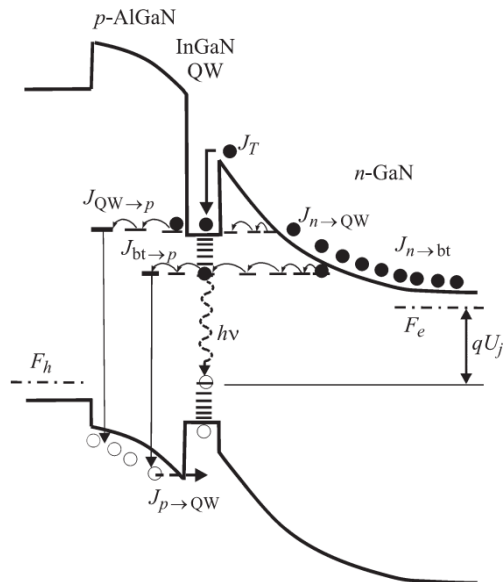


Рисунок 2 – Иллюстрация протекания туннельно-рекомбинационных и надбарьерных токов в  $p$ - $n$ -структуре на основе GaN [1\*]

Постепенно меняющийся цвет фонового излучения с увеличением напряжения соответствует туннельно-рекомбинационному току  $J_n$  в хвосты состояний под квантовой ямой с энергией излучаемого кванта света  $h\nu \approx eU$ . Это подтверждается плавным изменением спектра в направлении коротковолновой области с увеличением напряжения, а также результатами работы Кудряшова В.Е. и Юновича А.Э. [2\*], где проводились измерения спектра и рассматривался механизм туннельной излучательной рекомбинации.

Что касается точечной составляющей свечения, то цвет и площадь точечной компоненты от напряжения не меняются. Цвет свечения точечной составляющей обусловлен также туннельно-рекомбинационными процессами с участием квантовых ям с неоднородным содержанием индия, приводящим к флуктуации ширины запрещенной зоны по площади слоев активной области и возникновению сегментирования квантовых ям, островков и квантовых точек в слоях InGaN. Поскольку из-за флуктуаций концентрации индия глубина вышеперечисленных образований в КЯ не является постоянной для всей площади активной зоны, при напряжении смещения 1,9–2,0 В наблюдается сначала свечение красных точек, соответствующих сегментам КЯ с повышенной концентрацией индия ( $J_{n-QW}$ ), а при увеличении напряжения

смещения  $U$  начинают светиться сегменты КЯ с меньшей концентрацией индия.

Таким образом, картины данного сверхслабого свечения отражают наличие и планарное распределение сегментированных квантовых ям, островков и квантовых точек, а также планарное распределение концентрации точечных и линейных дефектов, обусловленное недостатками технологии изготовления гетероструктуры СИД (входной контроль) и динамикой деградационных процессов во время испытаний.

С целью проведения спектрального анализа полученных изображений было разработано программное обеспечение (ПО) для подсчета количества пикселей определенных цветов и вывода их процентного соотношения. Рассмотрим пример обработки цифровой фотографии свечения СИД. Результат анализа картины представлен на рисунке 3: выделены области зеленого, красного и желтого.

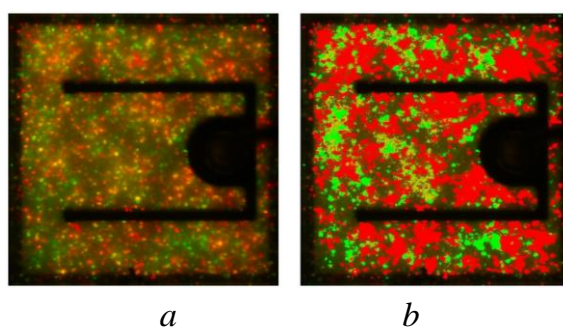


Рисунок 3 – Картина сверхслабого свечения СИД до (a) и после (b) анализа в ПО

На рисунке 4 представлены результаты анализа картин сверхслабого свечения СИД при прямом напряжении смещения  $U = 2,1$  В до и после испытаний.

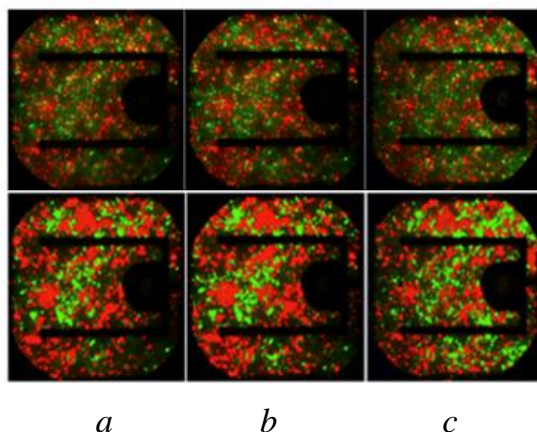


Рисунок 4 – Картины свечения СИД до (сверху) и после (снизу) анализа в ПО в зависимости от времени испытаний:  $a$  – до испытаний;  $b$  – после 33 ч;  $c$  – после 84 ч

После испытаний наблюдается увеличение площади свечения зеленого цвета (11%) и уменьшение красного (10%), при этом изменения площади свечения желтого цвета были не значительными (1%). Увеличение сплошной составляющей зеленого цвета связывается с начальной стадией развития деградиционных явлений (накоплением точечных дефектов структуры).

Динамика изменения картин сверхслабого свечения для СИД средней мощности в зависимости от времени испытания представлена на рисунке 5.

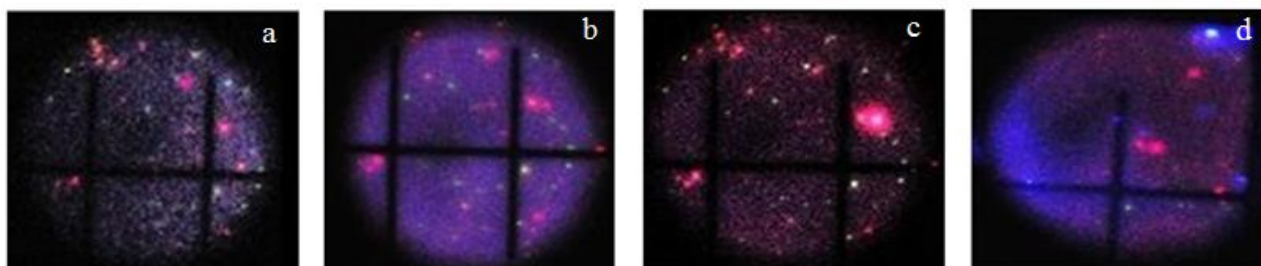


Рисунок 5 – Картины свечения СИД в зависимости от времени испытания образца:  
*a* – 0 ч; *b* – 480 ч; *c* – 960 ч; *d* – 1280 ч

Размер пятен от времени испытания возрастает, наблюдаются появление новых пятен и исчезновение ранее существовавших. В красных пятнах должна наблюдаться большая электропроводность, чем в других областях слоя, так как там повышенная концентрация индия. После испытаний площадь наиболее активного красного пятна увеличилась примерно в 8 раз.

Если сравнить изменения активного сопротивления образца СИД после такого же времени испытаний, то можно увидеть, что она коррелирует с динамикой увеличения площади. Можно предположить, что «мостики» омического сопротивления возникают в местах формирования шнуров повышенной электропроводности.

Как видно из рисунка 5,*d*, на картине свечения появляются синие пятна. Одно из синих пятен появилось в ореоле бывшего большого красного пятна (рисунок 5,*c*).

На рисунке 6 приведена картина свечения СИД после термостресса – испытания, при котором температура кристалла составила 139,5 °С, что больше предельной рабочей температуры.

После таких испытаний туннельная ЭЛ возникала в виде синего пятна при гораздо более низком напряжении, (начиная от 0,7 В) (см. рисунок 6). При повышении напряжения до 1,3 В площадь и яркость свечения увеличивается. Становится видно, что оно возникает вблизи электродов, а при повышении напряжения до 2 В свечение возникает и в отдалении от электродов.

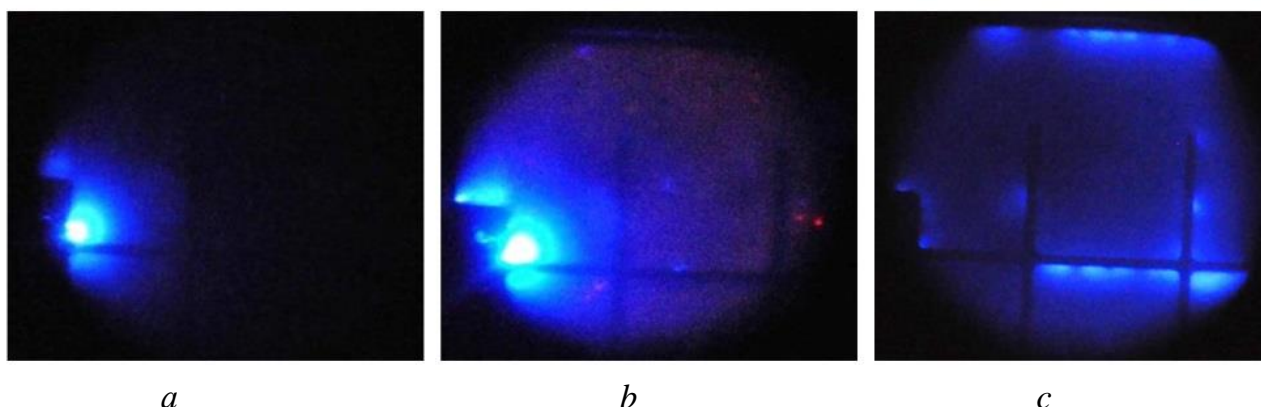


Рисунок 6 – Картины свечения СИД в зависимости от приложенного напряжения после частичного «прокола» гетероструктуры: *a* – 0,7 В; *b* – 1,3 В; *c* – 2,0 В

Изменения электрооптических характеристик СИД за 1280 часов испытаний являются лишь начальной стадией деградации, которая еще не приводит к значительному уменьшению яркости (т.к. общая яркость еще не упала на 50%). В связи с этим, данный метод можно применять для ранней диагностики будущих катастрофических изменений, которые приведут к более значительной потере яркости.

В **третьей главе** проведено исследование изменения вольтамперных характеристик СИД в зависимости от режимов и времени испытаний.

Исследование деградации структуры СИД производилось при токах, не превышающих номинальные значения. В некоторых случаях в конце испытания была добавлена стадия ускоренного испытания (термостресс), при котором специально был увеличен ток, при котором температура гетероструктуры СИД превысила допустимое значение на несколько градусов.

Сравнивая ВАХ СИД после долговременных испытаний с первоначальной (рисунок 7), можно сказать, что после испытаний ток утечки, обусловленный внутренними дефектами, возрос примерно на порядок, что согласуется с выводами многих авторов, что в процессе протекания через СИД тока большой плотности в гетероструктуре образуются дополнительные дефекты.

Действительно, с увеличением величины тока и времени испытаний в кристалле СИД увеличивается концентрация точечных дефектов, а значит, улучшаются условия туннелирования основных носителей от дефекта к дефекту через гетероструктуру [1\*].

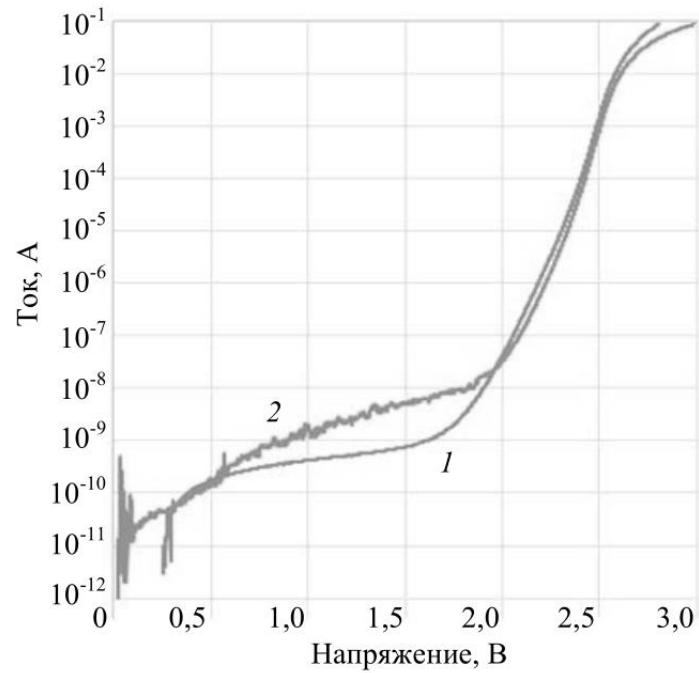


Рисунок 7 – Прямые вольтамперные характеристики в логарифмическом масштабе: 1 – до испытаний; 2 – после испытаний

На рисунке 8 представлены обратные ветви ВАХ СИД после испытаний и релаксации.

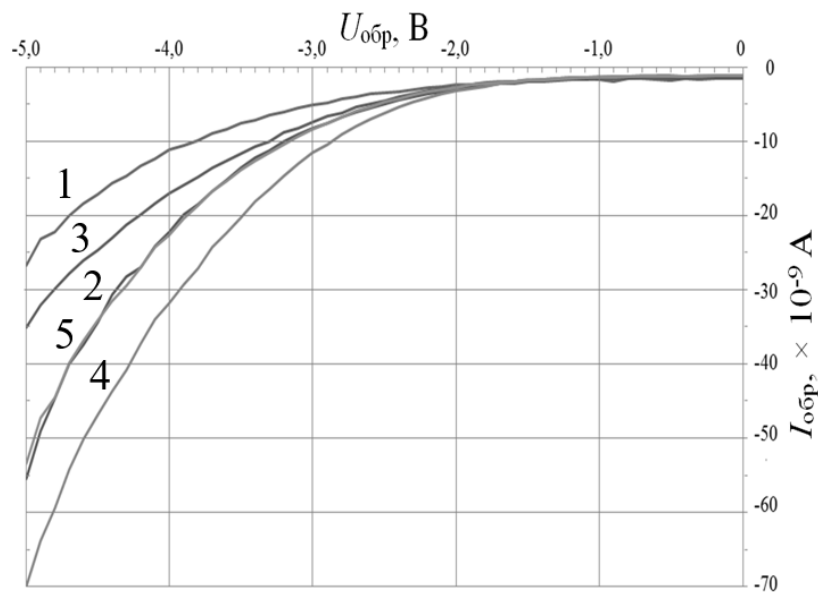


Рисунок 8 – Изменение обратных ВАХ СИД SL-V-B24AD после испытаний (2, 4) и после релаксации (3, 5)

Как видно из рисунка 8, обратные ветви ВАХ СИД после испытания демонстрируют устойчивый рост токов, однако после релаксации порядка 1 суток характеристика «восстанавливается», но не полностью. Было замечено,

что обратные токи СИД на начальной стадии деградации растут относительно медленно, однако затем резко ускоряются вплоть до выхода образца из строя.

Был сделан вывод, что туннельные токи, обусловленные прыжковой проводимостью по дефектам [1\*], являются основной составляющей обратного и прямого тока при малых смещения. С повышением концентрации дефектов вероятность прыжкового туннелирования носителей становится выше, что приводит к тому, что токи увеличиваются при обратном и малом прямом смещении.

Было показано, что **на ранних стадиях** испытаний СИД при номинальной величине рабочего тока при комнатной температуре, влияние встроенных электрических полей на начальных участках ВАХ нивелируется вследствие создания на гетерограницах активной зоны электрических диполей, возникающих в гетероструктуре при протекании тока большой плотности. **На более поздних стадиях** испытаний количество точечных дефектов (центров захвата) в квантовых ямах и буферных слоях увеличивается, вследствие этого увеличивается вероятность локальных туннельных переходов (рост прямой и обратной ветви ВАХ смещается в сторону меньших напряжений), которая по-видимому обусловлена прыжковым механизмом туннелирования носителей заряда вдоль дефектных трубок. **После многочасового отдыха** СИД (нахождения в выключенном состоянии при комнатной температуре) или при нахождении гетероструктуры при обратном напряжении не выше минус пяти вольт наблюдается некоторый эффект восстановления: происходит перераспределение локализованных на границах КЯ в процессе испытаний носителей заряда (захват их на более глубокие ловушки), обратная диффузия остаточных примесей и ионов металла в каналах предпочтительного переноса заряда, уменьшается ток утечки, увеличивается пороговое напряжение включения СИД. **На конечных стадиях испытаний** в канал предпочтительного зарядопереноса продолжают «затягиваются» ионы остаточных примесей и металла из электродов, что приводит к «проколу» гетероструктуры активной области, нестабильности и скачкам тока при формировании закороток.

В **четвертой главе** приведены аналитические оценки температуры локального перегрева, как в области отдельных протяженных дефектов, так и их скоплений, а также аналитическая оценка роли этого перегрева в дефектообразовании.

Рассмотрена модель одиночного протяженного дефекта в виде цилиндрического шнура радиуса  $R$  (рисунок 9).



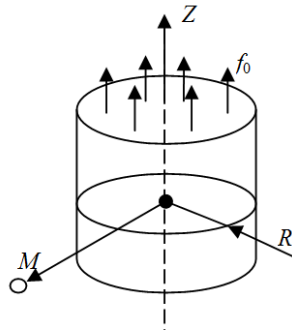


Рисунок 9 – Источник тепла, равномерно распределенный в цилиндрическом шнуре

Считаем шнур прямолинейным, имеющим осевую симметрию. Функция мощности  $f_0$  теплового источника имеет сугубо локальный характер, однако по площади шнура она имеет равномерное распределение такое, что

$$f(r) = \begin{cases} f_0, & r < R \\ 0, & r > R \end{cases}, \quad (1)$$

где  $r$  – расстояние от центральной точки шнура до некоторой точки  $M$  среды.

Поскольку толщина активной зоны  $L$  (длина теплового шнура) и радиус шнура  $R$  на несколько порядков меньше соответствующих размеров кристалла СИД, будем считать среду, в которой рассеивается тепло, бесконечной.

Уравнение теплопроводности имеет вид [3\*]:

$$\frac{\partial T(M, t)}{\partial t} = a \Delta T(M, t) + f(M, t), \quad (2)$$

где  $T(M, t)$  – температура точки среды  $M$  в момент времени  $t$ ;  $a$  – коэффициент температуропроводности;  $\Delta$  – оператор Лапласа;  $f(M, t) = \frac{q_v}{C \cdot \rho}$ ;  $q_v$  – плотность мощности тепловых источников;  $\rho$  – плотность среды.

Переходя к цилиндрической системе координат и учитывая, что для любого момента времени температура максимальна в центре шнура, целесообразно рассмотреть изменение температуры при  $r = 0$ .

При решении уравнения (2) воспользовались готовым решением в приближении цилиндрического источника тепла, приведенным в [4\*], с использованием двухмерной функцией Грина.

В результате аналитического решения, приведенного в диссертации, было получено выражение для зависимости величины температуры перегрева в центре шнура от времени

$$T(0,t) = f_0 t \left[ 1 - E_2 \left( \frac{R^2}{4at} \right) \right], \quad (3)$$

где  $E_2$  – интегральная экспонента, с аргументом  $R^2/4at$ ;  $f_0$  – функция мощности;  $R$  – радиус шнура.

Применив граничные условия и некоторые преобразования, получили более простую формулу для вычисления перегрева в центре теплового шнура:

$$T(0,t) = \frac{E \cdot I}{4\pi\lambda} \left( 1 - \gamma - \ln \frac{R^2}{4at} \right), \quad (4)$$

где  $\lambda = a \cdot \rho \cdot C$  – коэффициент теплопроводности;  $\gamma$  – постоянная Эйлера.

Как видно из выражения (4), существенное влияние на перегрев оказывают три параметра: напряженность электрического поля  $E$ , полный ток через тепловой шнур  $I$  и коэффициент теплопроводности среды  $\lambda$ . Значительно слабее влияет на перегрев радиус теплового шнура, так как входит в аргумент логарифма. Еще слабее должно влиять время воздействия напряжения на активную область СИД, поскольку в аргументе логарифма величина времени входит в первой степени.

Из трех параметров, существенно влияющих на перегрев, наиболее неопределенным оказывается величина тока в шнуре, которая определялась как величина рабочей плотности тока ( $J$ ) СИД, умноженная на площадь торца теплового шнура. Как известно, современные СИД имеют среднюю величину плотности рабочего тока, равную  $J = 150 \text{ А/см}^2$ . Таким образом, для радиуса величиной  $R = 10^{-7} \text{ м}$  величина полного тока равна:  $I = J \cdot S = J \cdot \pi \cdot R^2 = 150 \cdot 10^4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-14} \approx 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ А}$ .

Как видно из этого выражения, величина радиуса теплового шнура и полный ток через активную зону СИД взаимно связаны, причем квадратично. Таким образом, следует ожидать очень сильную зависимость перегрева от радиуса теплового шнура.

### Результаты расчета

Ниже приведены результаты расчета температуры перегрева в центре теплового шнура от радиуса шнура, при  $J = 150 \text{ А/см}^2$  (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты расчета для плотности тока, равной  $150 \text{ А/см}^2$

$R$ , мкм	0,1	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Delta T$	0,014	1,426	5,7	12,83	22, 82	35,65	51,35	69,9	91,3	115,5

Значения величины перегрева  $T$  в центре шнура при протекании тока  $I$  и при напряжении  $U$  даны для разных значений радиуса шнура.

Как видно из таблицы 1, перегрев при радиусах тепловых шнуров, соответствующих размерам выходов одиночных дислокаций ( $R \leq 10^{-7}$  м), незначителен. Однако при наличии объединений дислокаций и других протяженных дефектов в виде кластеров диаметрами в несколько микрон перегрев существенно возрастает. Очевидно, с увеличением рабочей плотности тока СИД величина перегрева может достигать опасных для работоспособности СИД величин при меньших диаметрах скоплений протяженных дефектов. Ниже приведены результаты расчета температуры перегрева локальных областей СИД при рабочей плотности тока, равной  $200 \text{ А/см}^2$  (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты расчета для плотности тока, равной  $200 \text{ А/см}^2$

$R$ , мкм	0,1	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Delta T$	0,02	1,9	7,6	17,1	30,42	47,5	68,4	93,18	121,7	154,5

Как следует из расчета, опасный для структуры локальный перегрев может возникать вследствие неоправданно завышенной рабочей плотности тока, а также при длительной эксплуатации. В этом случае в результате процессов прорастания дислокаций и генерации дефектов могут образовываться кластеры площадью в несколько квадратных микрометров (более десяти). В случае наличия процесса электродиффузии из металлического электрода опасный перегрев может возникать и при меньших сечениях кластеров.

Таким образом, показано, что температура локального перегрева активной области СИД зависит от величины радиуса теплового шнура и плотности рабочего тока, так что при радиусе канала предпочтительного зарядопереноса равном 6 мкм температура перегрева превышает 100-150 градусов, что соответствует критическому значению, при котором наступает катастрофическое изменение, приводящее к выходу из строя СИД.

Поскольку при перегреве, описанном в предыдущем расчете, могут возникать существенные термопластические явления, связанные с расширением вещества, было предположено, что в процессе испытаний при неоднородности протекания тока возникают термические напряжения, которые способствуют генерации новых дефектов, что приводит к увеличению размеров дефектных областей.

Далее был приведен расчет напряжений, возникающих в центре шнура вследствие перегрева. Для нахождения поля деформаций  $u_r(r)$  потребовалось решить уравнение механического равновесия. Для расчета использовалась та же модель, для изотропного цилиндра использовали готовое решение [5\*]:

$$u_r(r) = \frac{\alpha}{3} \cdot \frac{1+\sigma}{1-\sigma} \left\{ \frac{1}{r} \cdot \int_0^r T(\rho) \cdot \rho \cdot d\rho + (1-2\sigma) \frac{r}{R^2} \int_0^R T(\rho) \cdot \rho \cdot d\rho \right\}, \quad (5)$$

где  $\sigma$  – коэффициент Пуассона;  $R$  – радиус цилиндра;  $r$  – расстояние до точки, в которой оцениваются механические напряжения;  $T(\rho)$  – функция зависимости температуры внутри шнура от расстояния до центра;  $\alpha$  – температурный коэффициент объемного расширения.

Решив уравнение, получили следующее решение для вычисления напряжения в центре шнура:

$$\sigma_{rr} = (0) = \sigma_{\varphi\varphi} (0) = -\frac{\alpha ET(0)}{6(1-\sigma)}, \quad (6)$$

где  $T$  – превышение температуры в центре шнура;  $E$  – модуль Юнга.

Подставив в формулу (6) справочные значения, получим значения, представленные в таблице 3.

Таблица 3 – Зависимость перегрева и напряжения в центре шнура от его радиуса

$R$ , м	$5 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-6}$
$\Delta T$ , град.	47,5	68,4	93,18	121,7	154,5
$\sigma_{rr}$ , Па	$7,009 \cdot 10^6$	$1,009 \cdot 10^7$	$1,375 \cdot 10^7$	$1,796 \cdot 10^7$	$2,280 \cdot 10^7$

Расчет прочности, проведенный по формуле (6) показал, что напряжение в кристалле нитрида галлия при данных условиях составляет всего около 20 Мпа (см. таблицу 3), тогда как согласно справочным данным значение предела упругости составляет порядка 100 ГПа. Для генерации новых дислокаций полученного значения недостаточно. Таким образом, возникающие термопластические явления не могут приводить к возникновению новых дислокаций. Однако результаты, полученные в работе, показывают, что температура перегрева зависит от радиуса шнура предпочтительного зарядопереноса, который в конечном итоге зависит от размеров кластера дислокаций. А поскольку согласно представленному выше расчету генерация новых дислокаций невозможна, то вероятнее всего наблюдается движение (разбегание) дислокаций от области расширения вещества вследствие перегрева за счет термопластических явлений. Силу  $\tau$ , достаточную для движения дислокаций можно рассчитать по закону Гука:

$$\tau_{\max} = G \cdot x/b, \quad (7)$$

где  $\tau$  – сопротивление решетки сдвига;  $G$  – модуль сдвига;  $x/b$  – деформация.

При этом экспериментальные значения  $\tau$  в  $10^4$ – $10^5$  раз меньше максимального значения, которое составляет  $G/2\pi$ , а также чем больше радиус дислокации, тем меньше сила, необходимая для ее перемещения. А если учитывать, что в гетероструктуре нитрида галлия присутствует большая концентрация начальных дислокаций, которая составляет не менее  $10^9$  см<sup>-2</sup>, то можно предположить, что такое движение приведет к созданию кластеров с радиусом более 9 мкм. Это может вызывать новые источники перегревов, увеличение концентрации крупных дефектов и их расширение, что и наблюдается в эксперименте.

Был сделан вывод, что термомеханические напряжения, возникающие при локальных перегревах гетероструктуры, недостаточны для генерации новых линейных дефектов, но достаточны для движения уже имеющихся в структуре дефектов, что приводят к формированию кластеров дефектов и возникновению новых областей предпочтительного зарядопереноса и локального перегрева, что в конечном итоге и приводит к катастрофической деградации.

Результаты расчета подтверждаются полученными фотографиями поверхности и картин сверхслабого свечения СИД после испытаний.

Таким образом, показано, что величина температуры перегрева существенно зависит от величины плотности тока возбуждения электролюминесценции СИД и размеров областей скопления дефектов.

В **Заключении** к диссертации сформулирована физическая картина и перечислены основные достижения и полученные результаты.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана экспериментальная установка и методика измерений, с использованием высокочувствительной прецизионной измерительной техники, позволяющая визуально наблюдать картины планарного распределения интенсивности и цветовые оттенки слабого свечения СИД на основе нитрида галлия с МКЯ в области нано- и микротоков и проводить диагностические измерения ВАХ в диапазоне ( $10^{-12}$ – $10^{-6}$ ) А.

2. Установлено, что в многоямных InGaN/GaN светодиодах наблюдается сверхслабое свечение в диапазоне токов  $(0,07$ – $20) \cdot 10^{-6}$  А при напряжениях менее 2,3 В, которое пространственно неоднородно, имеет сплошную и точечную составляющие, и природа которого обусловлена структурно-чувствительными туннельно-рекомбинационными процессами.

3. Разработанное программное обеспечение позволяет произвести оценку распределения слабых микроисточников света по поверхности

кристалла и пиксельный анализ их спектральных характеристик в автоматизированном режиме.

4. Было установлено что изменение начальных участков прямых и обратных ветвей вольтамперных характеристик в диапазоне токов ( $10^{-12}$ – $10^{-6}$ ) А коррелирует с изменениями туннельно-рекомбинационного свечения, отражает и дополняет физическую картину деградационных явлений, происходящих в гетероструктуре в процессе испытаний: влияние встроенных кристаллических полей и образующихся на гетерограницах электрических диполей, смещение ветвей вольтамперных характеристик в сторону меньших напряжений, релаксационные процессы при паузах в испытаниях и локальные проколы активной области на конечной стадии.

5. Проведено исследование влияния локального перегрева при протекании токов большой плотности на процесс дефектообразования в гетероструктуре СИД посредством проведения электротеплового расчета, который показал, что перегрев при радиусах тепловых шнуров, соответствующих размерам выходов одиночных дислокаций ( $R \leq 10^{-7}$  м), незначителен, однако при наличии объединений дислокаций и других протяженных дефектов в виде кластеров диаметрами в несколько микрон перегрев уже может составить более 100 градусов, при этом генерации новых дислокаций в таких условиях не происходит, зато происходит движение уже имеющихся в структуре дефектов, что приводит к формированию кластеров дефектов и возникновению новых областей предпочтительного зарядопереноса и локального перегрева, что в конечном итоге и приводит к катастрофической деградации.

6. На основании полученных экспериментальных результатов и теоретических оценок сформирована физическая картина процессов, в которой основная роль в деградации СИД на основе GaN отводится описанию развития от времени испытаний модели на основе дислокационного шунта — многопрыжкового туннелирования носителей заряда по дислокационной линии, пронизывающей область объемного заряда *p-n*-перехода.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ РАБОТЫ**

### **Работы, опубликованные в рецензируемых журналах**

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

#### **Труды конференций, индексируемые в Web of Science, SCOPUS**

4. Test and measurement complex for investigation of GaN based high-brightness light-emitting diodes / S. Ekhanin, A. Tomashevich, A. Ermolaev, A. Loschilov // International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2016 (Proceedings). – 2016. – P. 7491776. – DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491776.

5. Tomashevich, A. 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.

#### **Материалы международных и всероссийских конференций**

6. О схожести явлений электрической деградации в диэлектриках и широкозонных полупроводниках / С. Г. Еханин, Н. С. Несмелов, Л. Ю. Солдатова, А. А. Томашевич // Материалы Двенадцатой международной конференции «Физика диэлектриков» (Диэлектрики-2011). – СПб. – Май-июнь, 2011.

7. 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.

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

9. Зависимость вольтамперных характеристик СИД от температуры / А. В. Ермолаев, И. С. Тен, Д. В. Богатырева [и др.] // Материалы Всерос. науч.-

техн. конф. «Научная сессия ТУСУР-2012». – Томск : В-Спектр. – 2012. – Ч. 1. – С. 135–137.

10. Определение температуры активной зоны светодиодных гетероструктур / А. А. Томашевич, Д. П. Матвеев, А. П. Чехоненко, Д. В. Петенев // Материалы Всерос. науч.-техн. конф. «Научная сессия ТУСУР-2013». – Томск : В-Спектр. – 2013. – Ч. 1. – С. 175–177.

11. Томашевич, А. А. Комплексные исследования деградации сверхъярких светодиодов при повышенных плотностях рабочего тока / А. А. Томашевич, А. В. Ермолаев, Д. В. Петенев // Материалы 53-й Международ. науч. студенческой конф. МНСК-2015: Квантовая физика. – 2016. – С. 58.

12. 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.

13. 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 Международ. науч. студенческой конф. МНСК-2016: Квантовая физика. – 2016. – С. 34.

14. 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 Международ. науч. студенческой конф. МНСК-2016: Квантовая физика. – 2016. – С. 33.

15. 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 докл. Международ. науч.-практ. конф. – 2017. – № 1-1. – С. 172–175.

16. 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 докл. Международ. науч.-практ. конф. – 2017. – № 1-1. – С. 156–159.

17. Томашевич, А. А. Исследование механизмов деградации полупроводниковых гетероструктур на основе нитрида галлия / А. А. Томашевич, С. Л. Аржаков, К. К. Слепцов // Перспективы развития фундаментальных наук : сб. науч. тр. XIV Международ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2017. – С. 10.



18. Афанасьев, Н. К. 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.

19. Еханин, С. Г. 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 докл. Междунар. науч.-практ. конф. – 2018. – № 1-1. – С. 94–97.

20. Еханин, С. Г. Исследование нестабильности электрических характеристик flip-chip-светодиодов / С. Г. Еханин, А. А. Томашевич, Н. К. Афанасьев // Электронные средства и системы управления : материалы докл. Междунар. науч.-практ. конф. – 2019. – № 1-1. – С. 105–108.

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

22. Еханин, С. Г. Исследование нестабильности тока в GaN-светодиодах на начальных участках ВАХ в зависимости от времени испытаний / С. Г. Еханин, А. А. Томашевич, А. В. Кинах, А. С. Степанова // Электронные средства и системы управления : материалы докл. Междунар. науч.-практ. конф. – 2020. – № 1-1. – С. 165–168.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1\*. Туннельная инжекция и энергетическая эффективность светодиодов на основе InGaN/GaN / Н. И. Бочкарева, В. В. Вороненков, Р. И. Горбунов [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2013. – Т. 47, № 1. – С. 129–136.

2\*. Кудряшов, В. Е. Туннельная излучательная рекомбинация в *p-n*-гетероструктурах на основе нитрида галлия и других соединений типа АШВV / В. Е. Кудряшов, А. Э. Юнович // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2003. – Т. 124, № 5. – С. 1133–1137.

3\*. Яворский, Б. М. Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – М. : Наука, 1964. – 847 с.

4\*. Арсенин, В. Я. Математическая физика / В. Я. Арсенин. – М. : ГРФМЛ – 1966. – 367 с.

5\*. Ландау, Л. Д. Теория упругости. Теоретическая физика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1987. – Т. 7. – 246 с.