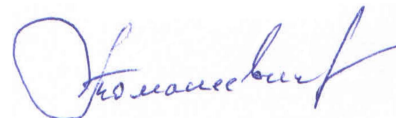


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»
(ТУСУР)

На правах рукописи



Томашевич Александр Александрович

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

Специальность 1.3.5 – «Физическая электроника»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д-р физ.-мат. наук, проф.
Еханин Сергей Георгиевич

Томск – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ДИАГНОСТИКИ ПРОЦЕССОВ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ GaN	12
1.1 Гетероструктуры на основе InGaN/GaN.....	12
1.2 Причины деградации GaN гетероструктур	15
1.3 Исследование InGaN/GaN гетероструктур СИД методом электролюминесценции	18
1.4 Исследование свойств InGaN/GaN гетероструктур при помощи электрических измерений	21
1.5 Исследование InGaN/GaN структур СИД фотоэлектрическими методами .	27
1.6 Модели прогнозирования срока службы СИД	33
1.7 Исследование InGaN/GaN структур СИД методами фотолюминесценции и фототока.....	38
1.8 Исследование структурных свойств активной области AlGaIn/InGaIn/GaN светодиодов	41
1.9 Выводы.....	47
1.10 Постановка целей и задач исследования	49
2 ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕЧЕНИЯ СВЕТОДИОДОВ НА ОСНОВЕ InGaIn/GaN С МКЯ В ДИАПАЗОНЕ ТОКОВ (10^{-9} – 10^{-6}) А	51
2.1 Объекты исследования и методика эксперимента	51
2.2 Исследование картин свечения в зависимости от напряжения	54
2.3 Описание программного обеспечения для анализа картин свечения	59
2.4 Исследование картин свечения при долговременных испытаниях.....	64
3 ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИД.....	69
3.1 Прямые ветви вольтамперной характеристики	69
3.2 Обратные ветви вольтамперной характеристики	75

3.3 Исследования нестабильности электрических характеристик flip-chip светодиодов в зависимости от времени испытания и релаксации	80
3.4 Исследование процессов релаксации вольтамперной характеристики после испытаний	84
4 ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫЕ И ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КРИСТАЛЛАХ СИД В УСЛОВИЯХ НЕОДНОРОДНОЙ ИНЖЕКЦИИ.....	90
4.1 Расчет температуры перегрева в области протяженного дефекта.....	90
4.2 Исследование роли термопластических явлений в деградации InGaN гетероструктуры светодиодов	95
4.3 Расчет термомеханических напряжений	99
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	105
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	110
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	111
Приложение А (справочное) Акты внедрения.....	123
Приложение Б (справочное) Результаты интеллектуальной деятельности.....	125
Приложение В (справочное) Справочные данные по расчету	126

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Перспективными материалами для создания сверхъярких источников света являются структуры на основе полупроводниковых нитридов [1–4]. Их особенностью является продолжительный срок эксплуатации по сравнению с традиционными лампами [5–7]. Особую актуальность приобрел вопрос повышения эффективности светодиодов, в том числе путем их эксплуатации при плотностях тока, превышающих номинальные значения, тем самым увеличивая яркость свечения [5–7]. 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 [5–6]. Многими исследователями [5–19] 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. 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.

Имеющиеся в литературе описания механизмов деградации мощных СИД показывают, что деградация СИД на основе GaN «сопровождается генерацией дефектов под действием инжекционного тока, электромиграцией остаточных ионов примеси и металлических ионов контактных площадок, а также увеличением плотности состояний на гетерограницах» [19].

Известны следующие механизмы, влияющие на интенсивность деградации характеристик СИД при повышенных плотностях рабочих токов: диффузия

металла и остаточных примесей вдоль скопления линейных дефектов; неоднородность инжекции; локальный перегрев активной зоны; подпороговая генерация дефектов; туннелирование носителей заряда по дефектам и др. [5–19].

При этом роль каждого из этих механизмов полностью не определена. Большое количество авторов [10–19] склоняется к значимой роли дефектообразования в процессе деградации.

При малых и средних плотностях тока протяженные дефекты структур не представляют значительных проблем, однако при больших плотностях могут приводить к катастрофическим разрушениям структуры [16].

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 [12, 17, 18]. Однако в структурах с множественными квантовыми ямами (МКЯ) такое свечение отсутствует или 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 туннельно-рекомбинационные явления представляют большой интерес для исследования.

Результат таких исследований предоставит возможность диагностики и контроля качества гетероструктуры до эксплуатации (входной контроль) и на различных стадиях деградации, а также возможность определения предельных характеристик приборов, что позволит устанавливать оптимальные эксплуатационные параметры для требуемого режима работы и срока эксплуатации.

Объект и предмет исследования

В качестве объекта исследования выбраны СИД фирмы SemiLEDs малой и средней мощности (Тайвань). Диоды изготовлены на основе гетероструктуры InGaN/AlGaIn/GaN кристаллов и собраны в стандартном пластмассовом корпусе

типа 5050. В связи с особенностью данного исследования образцы поставлялись без люминофорного покрытия. По своим электрическим и фотометрическим параметрам они являются типичными представителями изделий выпускаемых, как отечественными, так и зарубежными предприятиями. Поэтому результаты проведенных исследований на этих СИД могут быть распространены на другие подобные изделия.

Кроме того, исследовались и СИД, имеющие «перевернутую» конструкцию (Flip-Chip). Все светодиоды были предоставлены АО НИИПП г. Томска.

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.

Основные задачи исследования

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: величина напряженности 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 деградиционных явлений.

Результаты данной диссертационной работы могут быть взяты за основу в дальнейших исследованиях и разработке методик ранней диагностики деградации 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 деградиционных 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/см² 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 испытаний соответствуют каналам безызлучательной рекомбинации, образовавшимся вдоль пучка линейных дефектов. При значениях радиуса пучка линейных дефектов более 6–10 мкм локальный 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 научных положений и выводов подтверждается использованием прецизионного оборудования, современных экспериментальных и аналитических методов исследования, которые выбирались с учетом поставленных задач и особенности объекта исследования, а также согласованностью полученных результатов с современными представлениями о физических процессах деградации и дефектообразования в светодиодах на основе InGaN/GaN гетероструктур.

Результаты работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научно-технических конференциях: «Электронные средства и системы управления» (2017– 2021, Томск); «Научная сессия ТУСУР» (2011-2018, Томск); AIP Conference Proceedings (2017); INTERMATIC-2016 (Москва); «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 анализе состояния научно-технических решений, в проведении и анализе экспериментов, испытаний и расчетов, формулировке выводов и основных положений. Все результаты получены автором лично или при его непосредственном участии совместно с научным руководителем и с соавторами. Научным руководителем оказана помощь в постановке задач исследования, 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, пять глав 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.

1 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ДИАГНОСТИКИ ПРОЦЕССОВ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ GaN

1.1 Гетероструктуры на основе InGaN/GaN

Существует ряд методов возбуждения (накачки) полупроводниковых структур для получения когерентного монохроматического или некогерентного спонтанного свечения (люминесценции): воздействие электрическим полем, пучком быстрых электронов с высокой энергией, оптическое возбуждение и др.

При возбуждении электрическим полем в $p-n$ -переходе возникает свечение, называемое электролюминесценцией (ЭЛ). При наличии в $p-n$ -переходе квантовой ямы происходит более эффективное преобразование электрической энергии в световую [1].

На рисунке 1.1 представлен метод возбуждения рекомбинационного излучения путем инжекции носителей в $p-n$ -переход для случая наиболее простой гетероструктуры InGaN/GaN [1, 20, 21].

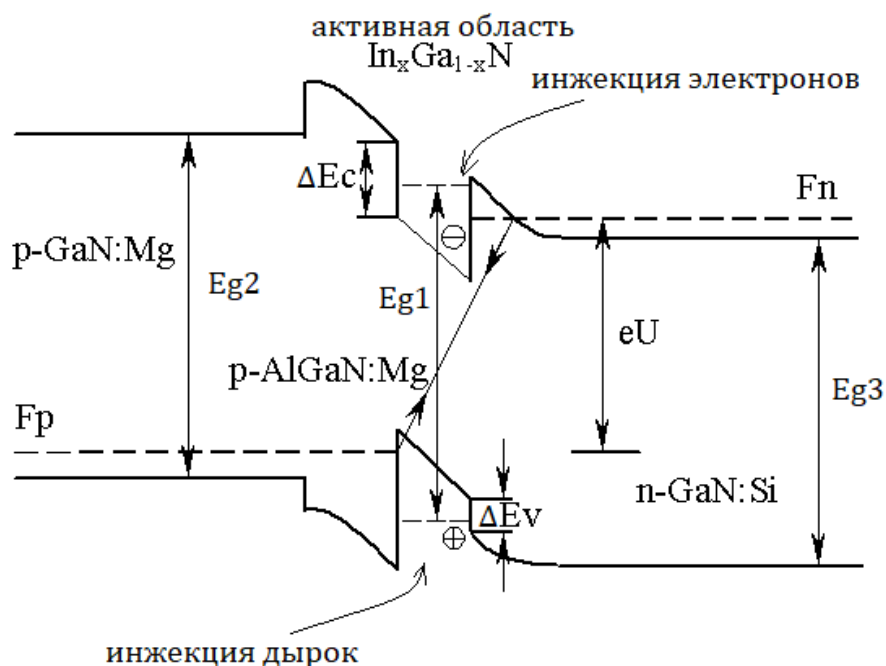


Рисунок 1.1 – Энергетическая диаграмма InGaN/AlGaIn/GaN гетероструктуры с одной квантовой ямой при прямом смещении U [21]

Инжекция электронов и дырок в активную область гетероструктуры происходит при попадании в энергетическую яму, называемую квантовой ямой (КЯ). При незначительном количестве дефектов в активной области электронно-дырочные пары прорекомбинируют в квантовой яме с излучением кванта света с энергией E_{g1} (см. рисунок 1.1) [1].

Как показано на рисунке 1.1, между p - и n -областями GaN полупроводника с шириной запрещенной зоны E_{g2} и E_{g3} соответственно, расположен тонкий слой InGaN с меньшей шириной запрещенной зоны E_{g1} . Толщина InGaN слоя может составлять порядка сотен или десятков атомных слоев [1].

Также на гетерограницах слоя имеются потенциальные барьеры для электронов ΔE_c и дырок ΔE_v . Когда к p - n -переходу приложено внешнее напряжение U , происходит инжекция электронов и дырок в узкозонный слой квантовой ямы. Электроны при этом стремятся занять состояния с наименьшей энергией, устремляясь на дно потенциальной ямы, а дырки устремятся к потолку валентной зоны, где их энергии минимальны. Если сильно легировать с обеих сторон внешние широкозонные области гетероперехода, увеличив концентрации равновесных носителей, удастся достичь значительных концентраций неравновесных носителей электронно-дырочных пар при инжекции. Поскольку атомы примеси могут служить центрами безызлучательной рекомбинации, отказ от легирования активной области принципиально важен [22].

Потенциальные барьеры ΔE_c и ΔE_v способствуют сдерживанию электронов и дырок соответственно в квантовой яме, поэтому они не могут диффундировать дальше и рекомбинируют в тонком активном слое с излучением фотонов [5, 21]. Для преодоления эффекта переполнения КЯ при увеличении рабочего тока используют гетероструктуры с несколькими КЯ.

На рисунке 1.2 показан вариант конструкции кристалла (а), смонтированном по технологии «Flip-Chip» для InGaN/AlGaIn/GaN гетероструктуры с пятью КЯ [23]. В изображенной конструкции p -область установлена на теплопроводящий корпус, а излучение выводится сквозь

подложку из сапфира. На рисунке 1.2,*b* изображена энергетическая диаграмма для гетероструктуры с 5 КЯ.

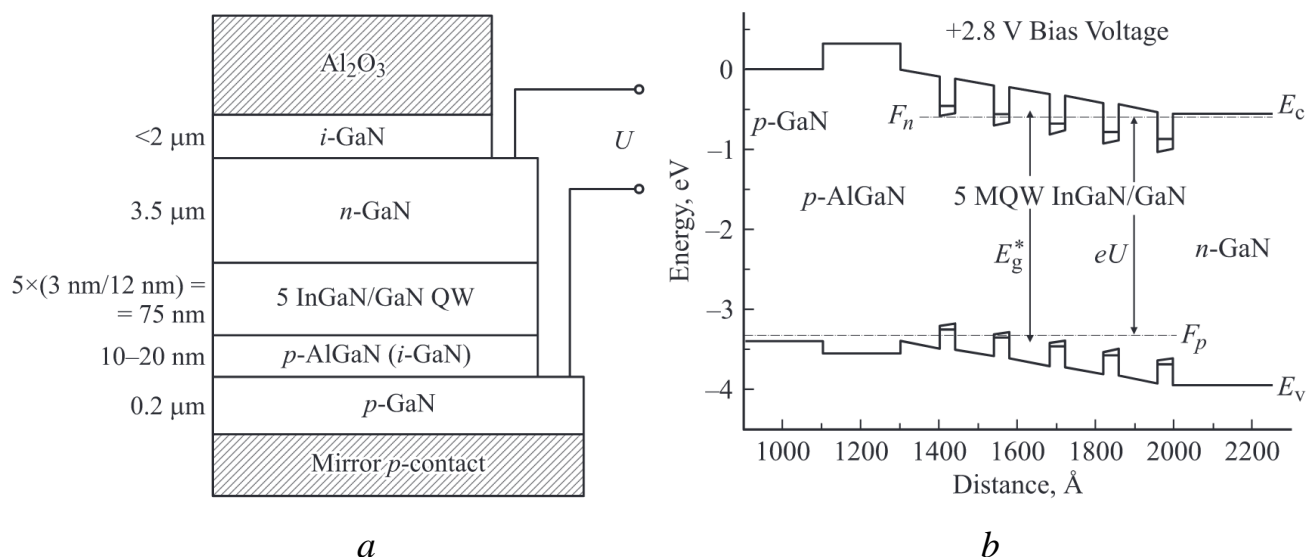


Рисунок 1.2 – Схема конструкции (*a*) и энергетическая диаграмма (*b*) гетероструктуры с пятью КЯ при прямом внешнем напряжении U [23]

Надежность и эффективность источников света на основе GaN гетероструктур в настоящее время определяется ключевыми этапами технологии [22]:

- технологией сборки кристалла в корпус;
- конструкцией и технологией изготовления прибора;
- выбором подложки для выращивания гетероструктуры (например, карбид кремния (SiC), сапфир (Al₂O₃), нитрид галлия (GaN));
- технологией создания AlGaIn/InGaIn/GaN гетероструктур с множественными квантовыми ямами (МКЯ).

При производстве светодиодов белого свечения в качестве источника излучения используют синий кристалл и наносят на него люминофор, тем самым преобразуя спектр исходного излучения в белый, а для увеличения квантового выхода необходимо использовать бездефектные кристаллы, а также высокоэффективные материалы люминофора [1, 5, 6].

Однако совершенства в технологии роста кристаллов не так просто добиться, поскольку в результате изготовления в кристалле возникают различные кристаллические дефекты (например, дислокации и точечные дефекты) [22], являющиеся центрами безызлучательной рекомбинации, приводящие к увеличению тепла, выделяемого внутри активного слоя [7, 8]. Плотность прорастающих дислокаций можно уменьшить более чем на порядок путем изменения угла эпитаксиального роста кристалла [24]. Однако в процессе эксплуатации светодиодных гетероструктур в них неизбежно возникают дополнительные дефекты и другие процессы электрической деградации.

1.2 Причины деградации GaN гетероструктур

Многие авторы [6–8, 25] провели исследования причин деградации СИД посредством испытаний методом ускоренного старения. В частности, было показано, что перегрузка в режиме постоянного тока может обуславливать значительное ухудшение внутреннего квантового выхода устройств: была установлена связь деградации с увеличением доли безызлучательной рекомбинации в активной зоне СИД из-за генерации/распространения дефектов [26], либо с диффузией примесей в область квантовой ямы [7, 27]. Также было показано, что эксплуатация СИД при высоких температурах может вызвать значительную деградацию оптических характеристик СИД, что, по мнению авторов, было связано с ухудшением электрических свойств омического контакта и полупроводникового материала на *p*-стороне структуры из-за взаимодействия с примесями водорода и магния, а также с потемнением люминофора вследствие воздействия повышенной температуры. Важную роль выделяют системам протяженных дефектов и их характеристикам [28].

Уже в первые 100 часов эксплуатации можно наблюдать заметные изменения вольтамперной характеристики, обусловленные электродиффузией примесей [28]. При этом наблюдалось [29] увеличение интенсивности излучения

на 12% к 100 часам работы, и на 28% к 500 часам, что авторы связывали с активацией акцепторов, после 500 часов начиналось постепенное снижение интенсивности излучения, связанное, согласно работе [30], с образованием донорных дефектов, которые компенсируют акцепторы и увеличивают долю безызлучательной рекомбинации. Также после 500 часов работы было отмечено увеличение интенсивности свечения желтой полосы спектра, которую в работе [31] связывают с дефектами.

В работе [32] было установлено, что на начальных стадиях испытаний в структурах мощных синих InGaN светодиодов с МКЯ появляется спектральная полоса в длинноволновой области. Также было отмечено, что вероятность ранних признаков старения более высокая для структур с «преждевременным включением», то есть с появлением слабого свечения при напряжениях на 0,2–0,3 В ниже напряжения работы, что объяснялось присутствием в них паразитных *p-n*-переходов с локальными областями, где завышена концентрация индия, и занижены потенциальные барьеры [32].

Также в работе [32] было отмечено, что неоднородный состав пленки приводит к неоднородным протеканиям тока и локальным перегревам, которые приводят к диффузии индия, что является причиной деградации структуры.

В работе [25] авторы предположили, основной причиной деградации оптических характеристик СИД после испытаний при прямом токе является именно протекание тока, а не температура. Отмечается, что подобные процессы деградации объясняются тем, что инжекция носителей заряда в активную область приводит к генерации/перемещению дефектов (таких как вакансии или включения) благодаря взаимодействию электронов большой энергии с кристаллической решеткой [25, 30].

В работе [14] «планарная неоднородность инжекции носителей заряда в квантовую яму до и после оптической деградации связывается с диффузией и электромиграцией водорода, индуцированной механическими напряжениями. Металлизация *p*-контакта может быть причиной генерации механических напряжений».

В работе [17] было показано, что основным механизмом прохождения носителей заряда сквозь область пространственного заряда является прыжковое туннелирование по дефектам, который способен понизить барьер. На рисунке 1.3 представлен механизм туннелирования носителей через барьер по дефектам с возникновением излучения и без него.

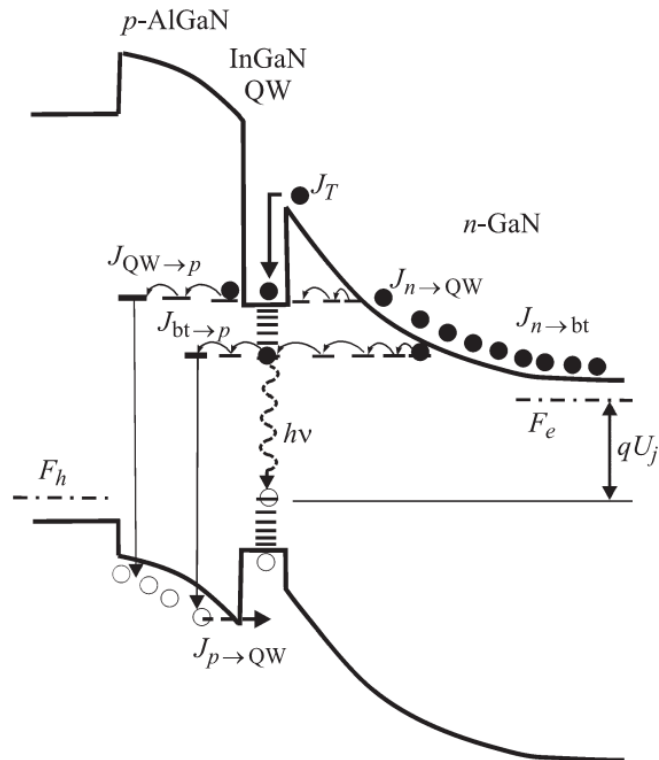


Рисунок 1.3 – Иллюстрация протекания туннельно-рекомбинационных и надбарьерных токов в p - n -структуре на основе GaN [17]

В работах [33, 34] падение эффективности связывают с утечкой носителей заряда из КЯ и из хвостов дефектных состояний на локальные уровни дефектов в запрещенных зонах барьерных слоев.

Таким образом, для выяснения причин деградиционных явлений (механизмов и кинетики протекания) **необходимо совершенствовать методы неразрушающего контроля состояния** гетероструктуры как после изготовления, так и в процессе испытания.

1.3 Исследование InGaN/GaN гетероструктур СИД методом электролюминесценции

В работе [35] представлено исследование спектров электролюминесценции светодиодов с InGaN/AlGaN/GaN гетероструктурой в ближней ультрафиолетовой области спектра. Исследования и разработка ультрафиолетовых (УФ) светодиодов (СИД) на основе InGaN/AlGaN/GaN гетероструктур проводились как для ближней части [36], так и для более дальней части [37] УФ спектра.

Также в работе [35] отмечено, что технология выращивания структур с активной областью с квантовыми ямами $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ для ближней части УФ спектра изучена лучше, чем технология структур типа $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ для более далекой области спектра. Исследование спектров светодиодов проведено в ближней УФ области, а также были исследованы силикатные люминофоры, покрывающие диоды, для создания источников видимого света.

На рисунке 1.4 представлены спектры электролюминесценции при малом и большом рабочем токе (5 и 350 мА, соответственно) для УФ светодиодов с большой площадью кристаллов.

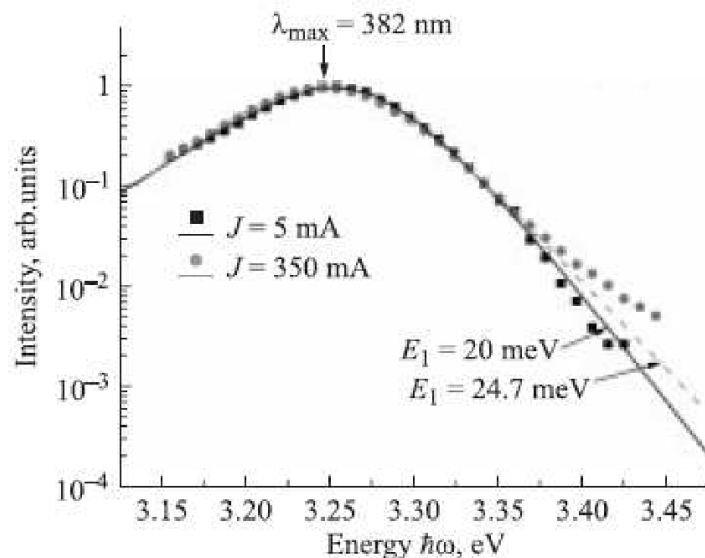


Рисунок 1.4 – Нормированные спектры электролюминесценции УФ диодов без люминофора при малом и большом токе: точки – эксперимент; линии – аппроксимационный расчет [35]

Как было показано в работе [35], в спектрах были обнаружены некоторые особенности: в спектрах светодиодов большой площади при малом токе (5 мА) наблюдалась слабая полоса около $\lambda=450$ нм ($\hbar\omega=2,75$ эВ), которую авторы связали с примесными состояниями с глубокими уровнями в запрещенной зоне, а при увеличении тока интенсивность полосы становится пренебрежимо малой, то есть происходит насыщение этих состояний. В случае спектров синих и зеленых СИД были учтены хвосты плотности состояний и степень их заполнения носителями зарядов в активной области гетероструктуры, для чего использовалась 4-параметрическая модель.

В работе [30], в которой исследовались спектры голубых и зеленых гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN с одной КЯ при испытаниях в течение 100–2000 часов при токах до 80 мА, была предложена модель подпорогового образования дефектов горячими электронами, инжектированными в КЯ [30].

Также было отмечено, что долговечность приборов на основе нитридов зависит от дефектности структуры GaN [30]. Прогнозируемый срок службы GaN светодиодов составляет 100 000 часов [38], при этом для оценки срока службы СИД также применяются методы ускоренных испытаний при импульсных токах или высоких температурах.

Также в работе [30] при исследовании спектров голубых светодиодов было обнаружено, что при малых токах (порядка 0,15 мА) доля туннельной компоненты излучения (с энергией 2,2 эВ в максимуме спектра) увеличилась после старения приблизительно в 3 раза, при этом интенсивность инжекционной компоненты люминесценции не изменилась (рисунок 1.5), что может свидетельствовать о чувствительности туннельного излучения к деградации.

Исследование интерференционных эффектов в светодиодных гетероструктурах InGaIn/AlGaIn/GaN синего свечения методами спектроскопии электроотражения и электролюминесценции, проведенное в работе [9], показало, что наблюдаемые в спектрах электроотражения и электролюминесценции в синей области периодические полосы в целом обусловлены интерференционными эффектами в структуре, при этом появление интерференционных полос в

спектрах электроотражения объясняется модуляцией встроенных в активной области гетероструктуры электрических полей.

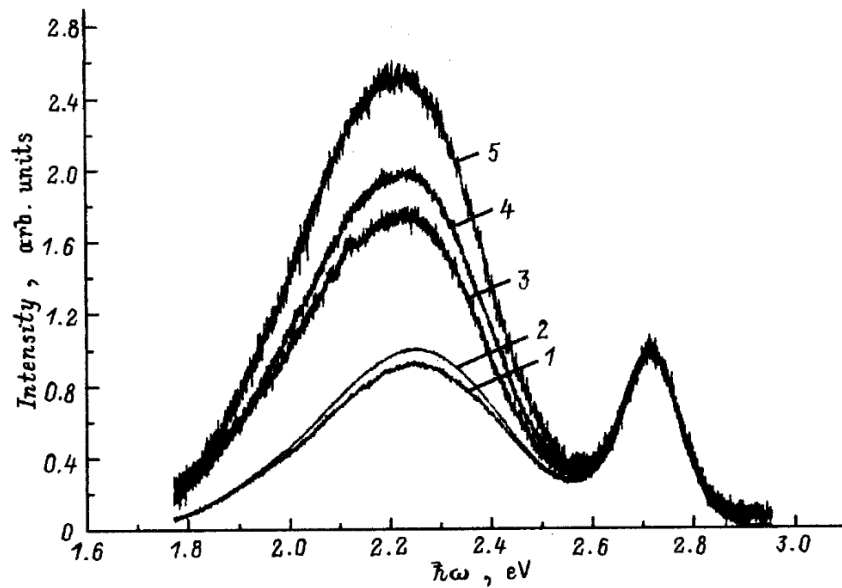


Рисунок 1.5 – Спектры ЭЛ голубых светодиодов при токе 150 мкА после испытаний t , ч: 1 – 0; 2 – 72; 3 – 558; 4 – 800; 5 – 1000 [30]

В работе [12] были исследованы характеристики голубых и зеленых InGaN/GaN светодиодов с модулированно-легированными МКЯ, где было установлено, что у таких структур изменения максимумов спектра с изменением тока меньше выражены, чем у структуры с нелегированными барьерами. Энергетическая диаграмма структуры изображена на рисунок 1.6.

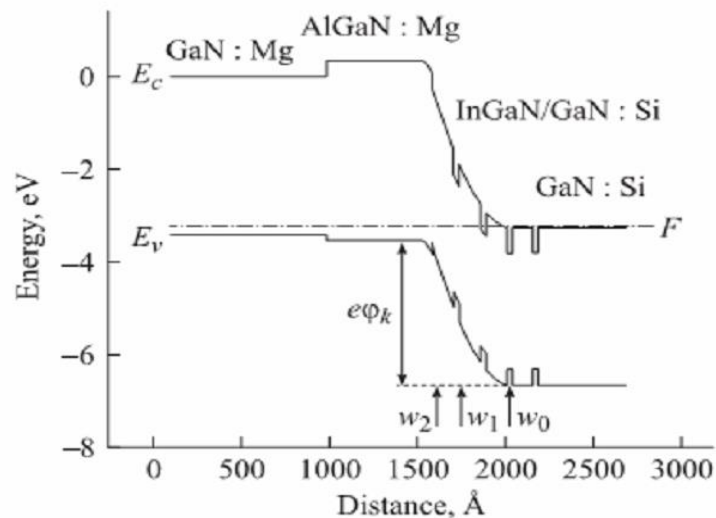


Рисунок 1.6 – Энергетическая диаграмма структур для голубого диода с модулированно-легированными МКЯ [12]

Таким образом, следует отметить, что при низких уровнях инжекции в структурах без КЯ интенсивность излучения определяется рекомбинацией по механизму Шокли – Рида – Холла [1, 39], а в гетероструктуре с КЯ – туннельно-рекомбинационными процессами [17, 18, 30, 39–42], которые чувствительны к процессам дефектообразования и деградации в целом.

1.4 Исследование свойств InGaN/GaN гетероструктур при помощи электрических измерений

В работе [10] отмечено, что путем измерения емкости и проводимости можно наблюдать уровни, вызванные протяженными и точечными дефектами, ответственными за формирование каналов безызлучательной рекомбинации.

Также в работе [10] с помощью вольт-фарадных характеристик был получен профиль концентрации основных носителей заряда, которые несут информацию о количестве и характеристиках квантовых ям (рисунок 1.7).

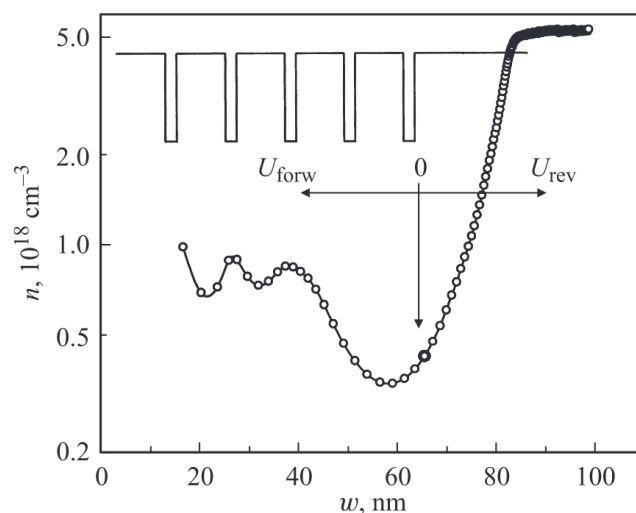


Рисунок 1.7 – Профиль концентрации носителей заряда [10]

Также было показано, что с помощью температурных спектров емкости (проводимости) можно анализировать характеристики центров эмиссии (рисунок 1.8) [10].

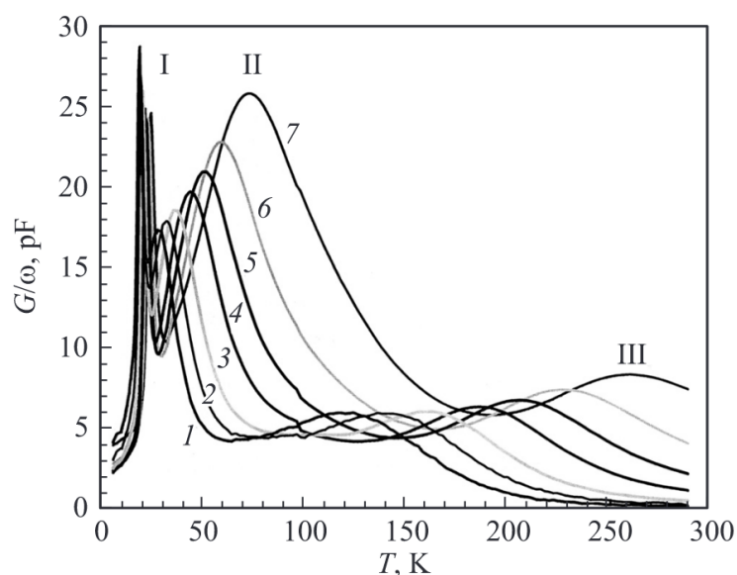


Рисунок 1.8 – Температурные спектры проводимости структуры InGaN/GaN при $U = 0$. Частоты измерений, кГц: 1 – 5; 2 – 10; 3 – 20; 4 – 50; 5 – 100; 6 – 200; 7 – 500 [10]

Было отмечено, что представленные подходы могут использоваться для комплексной диагностики электрических и физических параметров структур [10].

Для оценки концентрации электрически-активных дефектов (или ловушек) применяется метод переходной спектроскопии глубоких уровней (Deep-level transient spectroscopy, DLTS), который заключается в измерении емкости при подаче импульса напряжения. Перезарядку глубоких уровней также можно увидеть по смещению вольт-фарадных (C - V) характеристик, если измерить их при освещении белым светом и в темноте [11], как показано на рисунке 1.9).

Также в работе [11] показаны различия вольтамперных характеристик образцов InGaN/GaN гетероструктур для хорошо упорядоченной структуры (рисунок 1.10, кривые 3 и 4) и для структуры с большой плотностью дислокаций (рисунок 1.10, кривые 1 и 2).

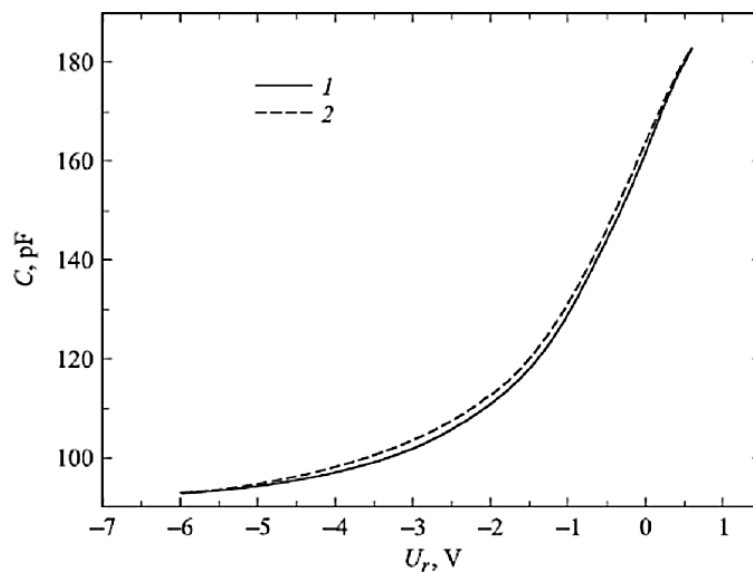


Рисунок 1.9 – C - V -характеристика InGaN/GaN гетероструктуры с МКЯ в темноте (1) и при воздействии светом (2) [11]

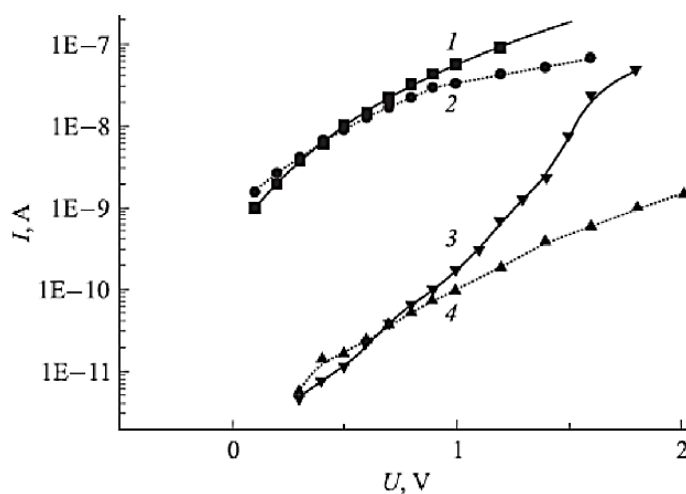


Рисунок 1.10 – Вольтамперные характеристики светодиодов: прямая (1) и обратная (2) ветви светодиода типа В; прямая (3) и обратная (4) ветви светодиода типа А [11]

Из рисунка 1.10 видно, что в случае дефектной структуры токи начальных участков вольтамперных характеристик на несколько порядков выше.

В работе [32] было отмечено, что в процессе электрического старения гетероструктуры СИД наблюдается увеличение токов при малых напряжениях, как изображено на рисунке 1.11.

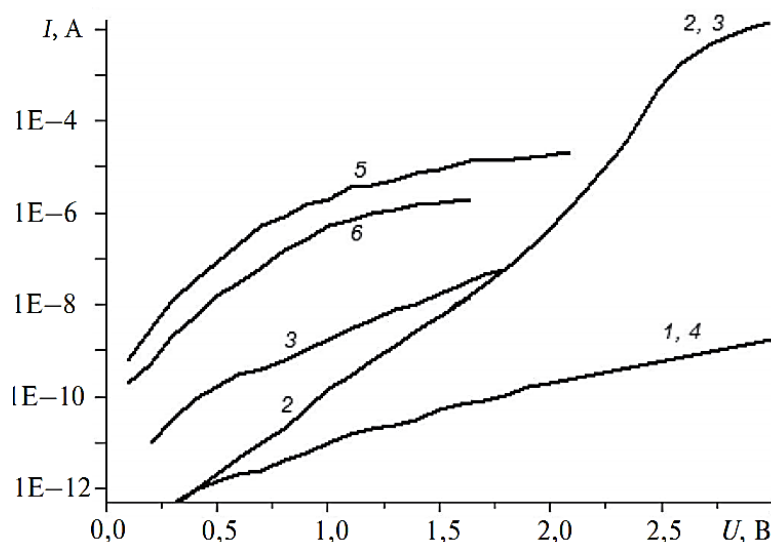


Рисунок 1.11 – Вольтамперные характеристики до испытания (1, 2) после 10 ч (3, 4) и 60 ч (5, 6) испытаний; 1, 4, 6 – обратные ветви; 2, 3, 5 – прямые ветви [32]

Также было указано на то, что неоднородный состав пленки приводит к неоднородным протеканиям тока и локальным перегревам, которые приводят к диффузии индия, что является причиной деградации структуры [32].

В работе [30] показано, что существенной частью изучения процессов старения является исследование распределения эффективной концентрации заряженных центров в области пространственного заряда в процессе старения. Было отмечено, что после испытаний при токе 80 мА в течение 800 часов увеличивалась туннельная компонента тока на начальных вольтамперных характеристиках (при малых напряжениях), как изображено на рисунке 1.12 [30].

В работе [15] было показано для светодиодов с одной КЯ, которые подвергались высокому инжекционному току и высокому обратному напряжению (-20 В), что постепенные изменения ВАХ указывают на слабое формирование точечных дефектов, которые увеличивают долю безызлучательной рекомбинации и туннелирования при малом напряжении, как показано на рисунке 1.13.

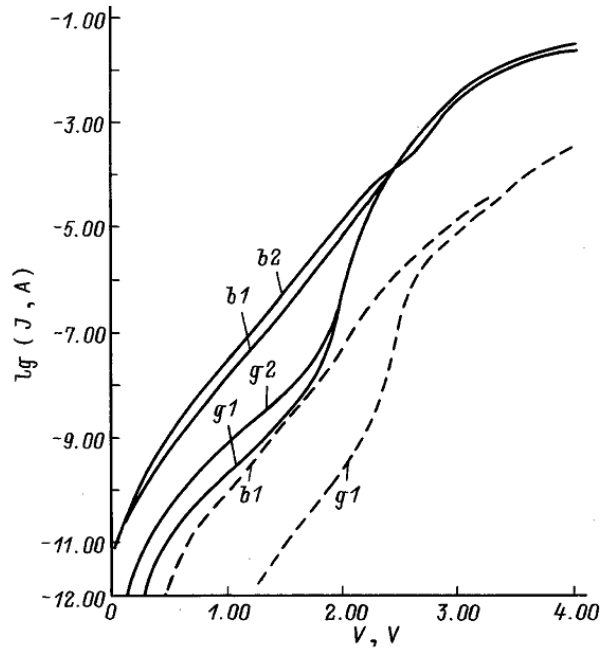


Рисунок 1.12 – ВАХ голубых (*b*) и зеленых (*g*) светодиодов при $T=300$ К (сплошные линии) и $T=80$ К (штриховые линии) до (1) и после (2) испытания [30]

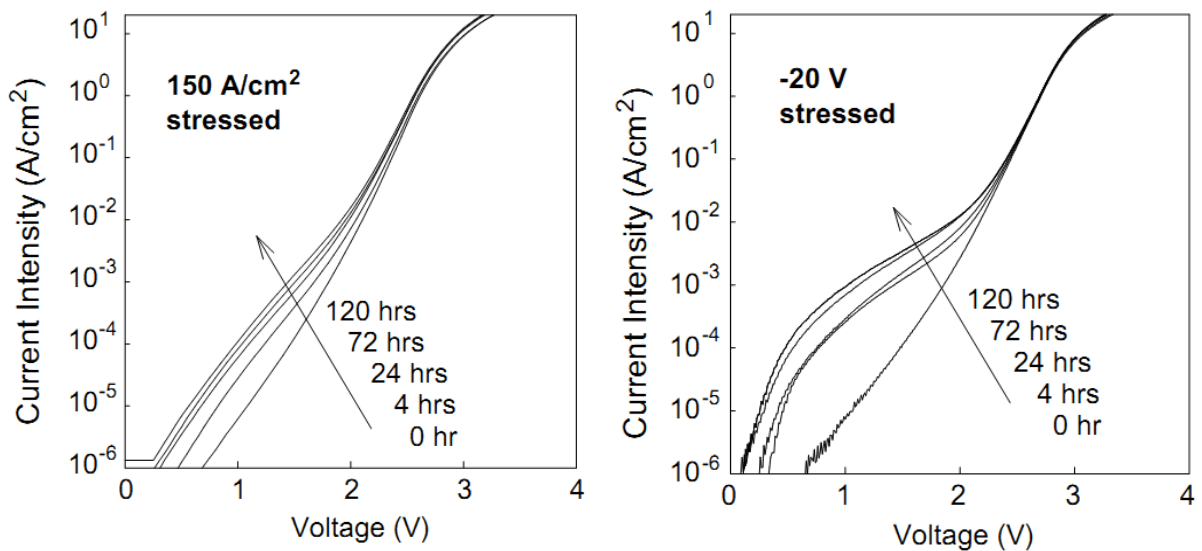


Рисунок 1.13 – Прямые вольтамперные характеристики СИД до и после испытания при плотности тока 150 A/cm^2 (слева) и напряжении -20 В (справа)

Были представлены две различные модели генерации дефектов. В диодах при высоком токовом стрессе при прямом напряжении это вероятно происходит посредством термической активации и увеличения процесса рекомбинации, в то

время как в диодах после воздействия обратного напряжения, изменения в материале возникли из-за лавинного пробоя на границах области пространственного заряда вблизи имеющихся микроструктурных дефектов.

В работе [16] сравнивалось поведение деградационных процессов в голубых и фиолетовых светодиодах с МКЯ на основе гетероструктур InGaN/GaN. Было установлено [16], что деградация как синих, так и фиолетовых диодов обусловлена увеличением числа эффективных центров безызлучательной рекомбинации в активной области структуры. На рисунке 1.14 представлены вольтамперные характеристики для голубых и фиолетовых светодиодов.

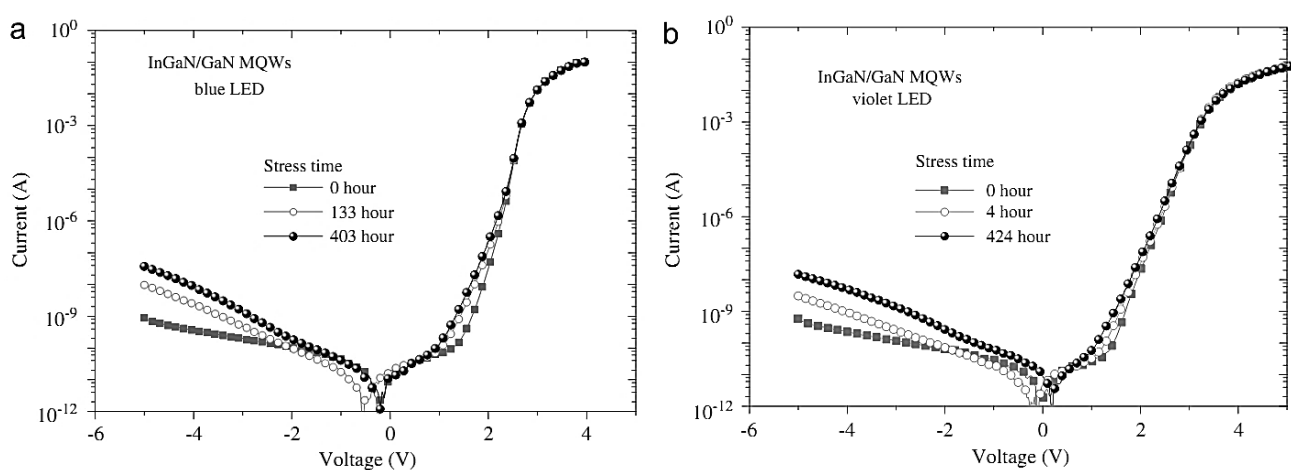


Рисунок 1.14 – Вольтамперные характеристики голубых (a) и фиолетовых (b) СИД с МКЯ до и после испытания [16]

Также было показано [16] изменение токов при значении обратного напряжения -5 В в зависимости от времени испытаний (рисунок 1.15).

Из вышеизложенного следует, что накопление дефектов в процессе токовых испытаний в первую очередь сказывается на увеличении значения токов на начальных участках прямой ВАХ, увеличиваются при этом и обратные токи. Как указывается в анализируемых работах токи, в отмеченных авторами участках ВАХ, обусловлены наличием дефектов и процессов туннелирования.

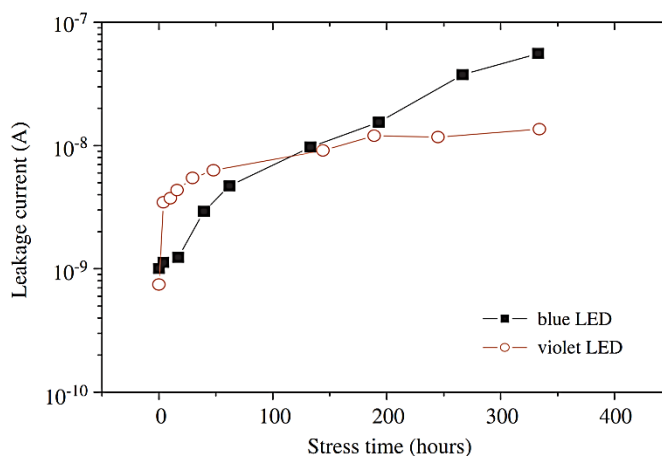


Рисунок 1.15 – Срез обратной ветви ВАХ при напряжении -5 В в зависимости от времени испытаний

1.5 Исследование InGaN/GaN структур СИД фотоэлектрическими методами

Другими информативными методами диагностики полупроводниковых гетероструктур являются методы емкостной и фотоэлектрической спектроскопии [10, 43–47]. Этими методами можно определять концентрации легирующих примесей, наличие глубоких уровней в запрещенной зоне буферных слоев и их характеристики: время жизни неравновесных носителей заряда, плотности поверхностных состояний и другие параметры.

Вольт-фарадная характеристика (ВФХ) – это зависимость емкости структуры, обусловленной наличием объемного заряда в различных областях структуры, от приложенного к ней напряжения. При измерении ВФХ и емкостной спектроскопии полупроводниковых гетероструктур на образец СИД подают два напряжения: постоянное, обеспечивающее задание рабочего режима, и переменное напряжение малой амплитуды, необходимое для измерения емкости этой структуры. При этом на данную гетероструктуру воздействуют внешним фотоактивным излучением, вызывающим фотоэффект в отдельных слоях структуры. При приложении внешнего напряжения U толщина обедненного слоя

p - n -перехода и его барьерная емкость также будут меняться. Решая уравнение Пуассона, можно получить распределение напряженности электрического поля и потенциала в резком p - n -переходе и выражение для контактной разности потенциалов и толщины обедненной области.

$$q\varphi_0 = kT \ln \frac{N_d N_a}{n_i^2} ; \quad (1.1)$$

$$\delta = \delta_n + \delta_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(N_d + N_a)}{qN_d N_a}(\varphi - U)} , \quad (1.2)$$

где N_d , N_a – концентрация донорной и акцепторной примесей; n_i – собственная концентрация; ε_0 – диэлектрическая постоянная; ε – относительная диэлектрическая проницаемость.

Для описания ВФХ светодиодов с МКЯ используют модель резкого p - n -перехода. Величина барьерной емкости $C_{\text{бар}}$ p - n -перехода площадью S получают выражением

$$C_{\text{бар}} = S \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 q N_a}{2(N_d + N_a)(\varphi_0 - U)}} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{\delta} . \quad (1.3)$$

Обычно p - n -переходы имеют несимметричное легирование и значение емкости определяется только концентрацией примеси слаболегированной области, например при $N_a \ll N_d$:

$$C_{\text{бар}} = S \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 q N_a}{2(\varphi_0 - U)}} . \quad (1.4)$$

Выражение для барьерной емкости гетероперехода с МКЯ существенно сложнее и определяется энергетической диаграммой гетероструктуры, но характер зависимости $C_{\text{бар}}$ от концентрации примеси и приложенного напряжения сохраняется.

Таким образом, наряду с проводимостью, которая определяется ВАХ, p - n -переход обладает емкостью, которую можно считать подключенной параллельно

переходу. Полная емкость p - n -перехода определяется суммой барьерной и диффузионной емкостей.

Вследствие сложной энергетической структуры гетероперехода с МКЯ, ВФХ светодиодов является нелинейной, а функция $C^2(U)$ имеет участки слабой и сильной зависимости емкости от приложенного напряжения, или так называемую систему участков, параллельных ординате (систему плато) [48], как показано на рисунке 1.16.

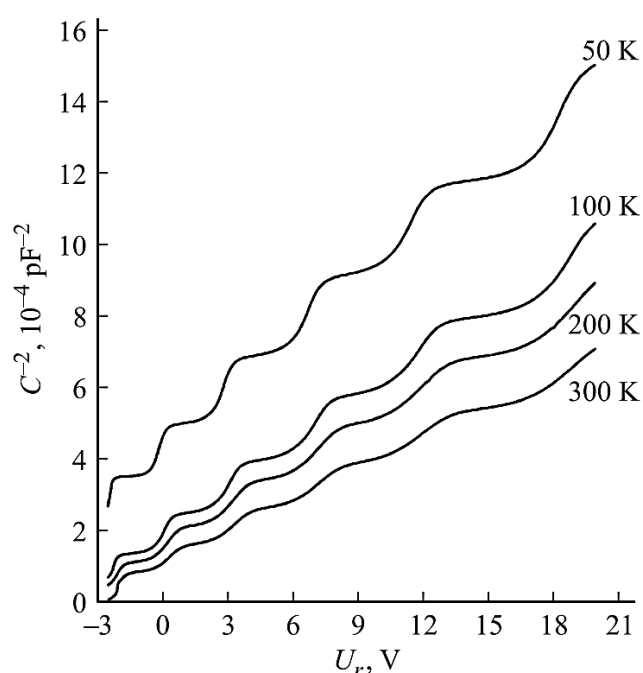


Рисунок 1.16 – Вольт-фарадные характеристики исследуемого образца СИД при различной температуре [48]

Количество таких плато равно числу квантовых ям, которые выявляются на ВФХ при их пересечении краем области объемного заряда при изменении $\delta(U)$. Каждое плато на зависимости $C^2(U)$ соответствует области обогащения носителями заряда, сформированными в отдельной квантовой яме.

Фотоэлектрические явления возникают при оптической генерации электронов и дырок в области межзонного поглощения КЯ и проявляются в виде фотовольтаического эффекта (ФВЭ) и фотопроводимости (ФП). Наиболее

подробно фотоэлектрические процессы в гетероструктурах с КЯ рассмотрены в работах [49–51].

На рисунке 1.17 представлена модель, предложенная в работе [49] в виде квантовых ям,строенных в p - n -переход. Если энергия фотонов внешнего облучения будет превышать ширину запрещенной зоны КЯ, то они будут поглощаться слоем КЯ и создавать в ней свободные электроны и дырки.

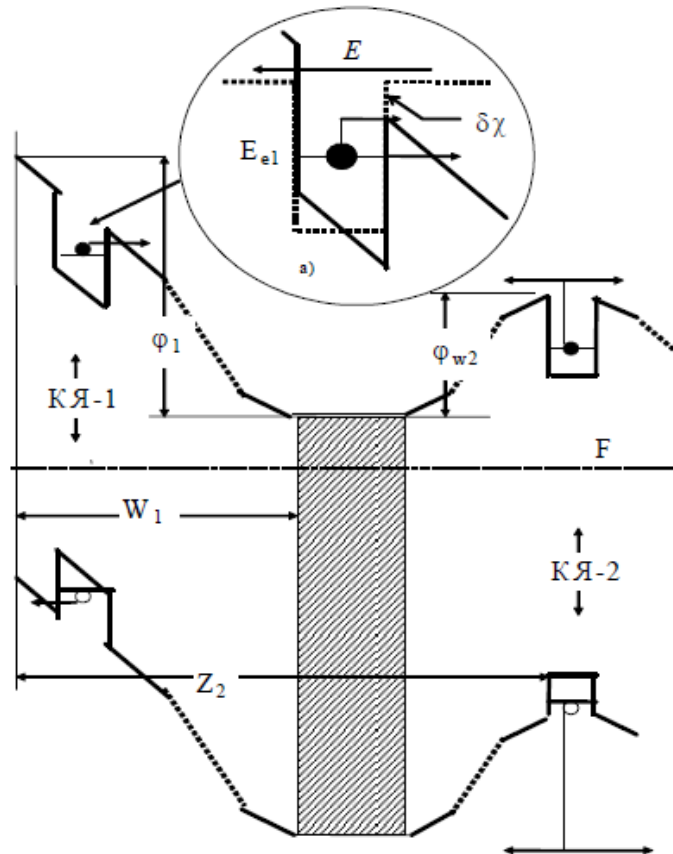


Рисунок 1.17 – Зонная диаграмма гетероструктуры с различным расположением квантовых ям [49]

Межзонная рекомбинация таких свободных носителей (после термализации) будет проявляться в явлении фотолюминесценции (ФЛ). Электроны и дырки, обладающие достаточной кинетической энергией, будут попадать в барьерную область, что будет сопровождаться фотопроводимостью.

Как указано в [49], для возникновения ФП и ФВЭ в области поглощения КЯ необходимо, чтобы в полупроводнике, в котором встроена КЯ, имелся

энергетический барьер. Разделение в электрическом поле барьера электронно-дырочных пар приводит к возникновению довольно сильной ФП и/или ФВЭ.

Предложенный в работах [48, 52] фотоэлектрический метод диагностики светодиодных InGaN/GaN-гетероструктур с МКЯ, который заключается в исследовании зависимости фототока (ФТ) $I_{\text{ф}}$ от прикладываемого к p - n -переходу обратного напряжения $U_{\text{обр}}$ при возбуждении светом в диапазоне длин волн, соответствующих краю оптического поглощения InGaN (квантовой ямы), показал, что при увеличении обратного напряжения область объемного заряда расширяется, и граница этой области последовательно проходит через квантовые ямы исследуемой гетероструктуры, в результате чего на зависимости $I_{\text{ph}}(U_{\text{r}})$ – наблюдались особенности.

На рисунке 1.18 представлено сравнение фотоэлектрических (a) и вольт-фарадных (b) характеристик образца в зависимости от температуры.

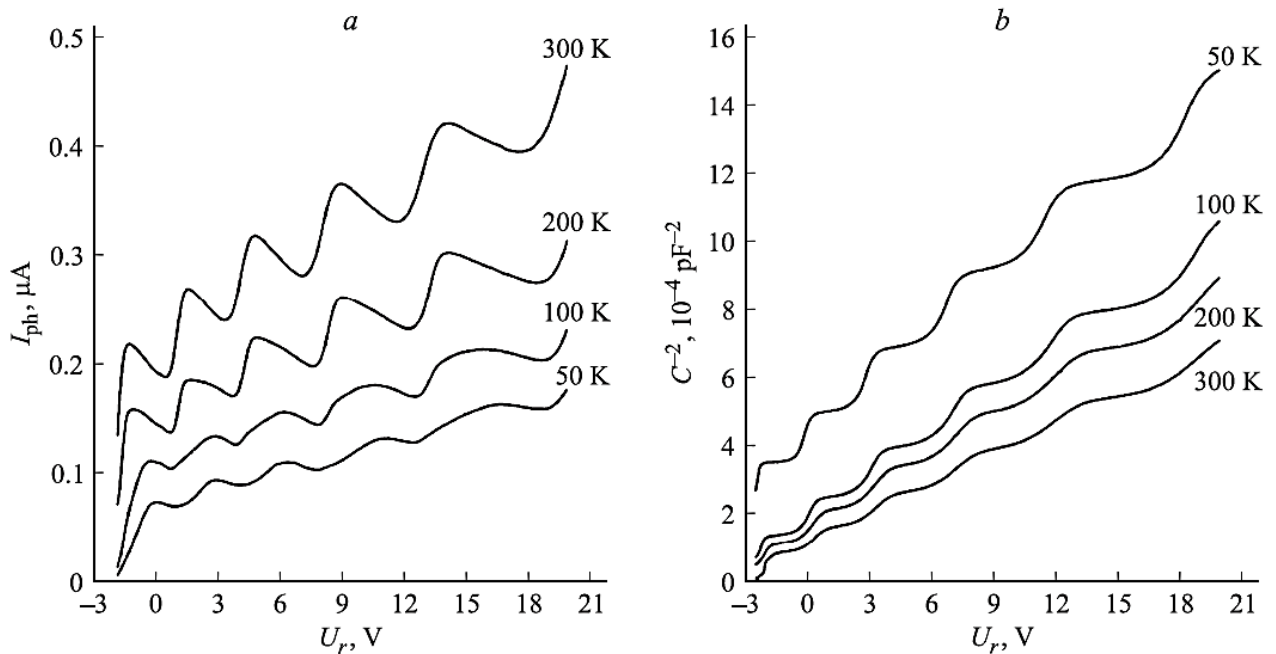


Рисунок 1.18 – Сравнение фотоэлектрических (a) и вольт-фарадных (b) характеристик исследуемого образца при различных температурах [48]

Как показано в работе [48], если КЯ находится внутри области объемного заряда, фототок возникает при пространственном разделении электронно-

дырочных пар под действием электрического поля p - n -перехода и резко возрастает, когда граница области пространственного заряда проходит КЯ, что наиболее отчетливо видно при комнатной температуре, что авторы связали с преодолением генерируемых светом носителями потенциального барьера КЯ благодаря механизму теплового «выброса» (см. рисунок 1.18).

На рисунке 1.18 (b) приведены ВФХ этого же образца СИД, измеренные при разной температуре. Сравнивая фотоэлектрические и вольт-фарадные зависимости авторы [48] пришли к выводу, что применение фотоэлектрических исследований для диагностики качества гетероструктур предпочтительнее, чем исследование ВФХ, т.к. особенности, обусловленные фотоэффектом в КЯ выявляются только при низкой температуре.

Авторы [53, 54] применили фотоэлектрический метод не только для интегральной диагностики гетероструктур СИД с МКЯ, но и используя аппаратно-программный комплекс с локальным фотовозбуждением, для исследования пространственного распределения фототока по поверхности гетероструктуры [53]. При этом минимальный шаг перемещения позиционера составлял 10 мкм, при минимальном размере диаметра лазерного пучка 14 мкм.

В экспериментах использовались лазерные диоды, излучающие на длинах волн 405, 445, 515 нм. Еще одной возможностью данного аппаратно-программного комплекса является измерение спектральных характеристик фотолюминесценции в различных областях исследуемого образца с помощью оптоволоконного спектрометра.

Для оценки характера распределения параметров фотоэлектрических характеристик по площади гетероструктуры поверхность кристалла условно разделялась на семь сегментов, а для оценки неоднородности распределения параметров по поверхности кристалла использовалось соотношение среднеквадратичного отклонения уровня ФТ и центральной длины волны ФЛ к их средним значениям [53].

Проведенные в работах [53, 54] измерения распределений интенсивности ЭЛ и фотопоглощения по поверхности кристалла при малых токах (до 10 мкА) с

локальным фотовозбуждением структуры лазерным излучением (405 нм) позволили выявить локальные области кристалла с повышенной концентрацией дефектов, обусловленные двумя факторами: неоднородностью распределения центров безызлучательной рекомбинации и локальным скоплением атомов индия в твердом растворе InGaN, что также было подтверждено результатами исследований методами сканирующей спектроскопии и фотолюминесценции в статическом режиме фотовозбуждения [55–59].

В работе [60] проводились исследования изменения распределения концентрации дефектов по площади кристалла СИД фотоэлектрическим методом при ускоренных испытаниях.

Совместный анализ профиля распределения дефектов по кристаллу и гистограммы распределения площади локальных областей кристалла по величине плотности дефектов показал, что в процессе испытаний происходит неравномерное увеличение плотности дефектов в различных областях кристалла: в более дефектных областях приращение концентрации дефектов больше.

1.6 Модели прогнозирования срока службы СИД

Для прогнозирования срока службы СИД применяются математические модели, основанные на экстраполяции результатов экспериментальных исследований спада мощности излучения при ускоренных испытаниях под действием повышенных температуры и тока [61–63] и модели, построенные на основании теоретического анализа физических процессов в СИД при длительном протекании тока [64, 65].

В одной из последних работ [65] используется известный механизм изменения концентрации комплексов Mg-H с увеличением времени испытаний [30].

Как известно, в процессе роста InGaN/GaN гетероструктуры в барьерном *p*-GaN слое, легированном магнием, образуется электрически нейтральные

магний-водородные комплексы Mg-H. В готовой гетероструктуре часть магния выступает в качестве акцепторной примеси, и часть оказывается в связанном состоянии. Под действием повышенной температуры и электрического тока, комплексы Mg-H могут разрушаться, что приводит к увеличению эффективной концентрации акцепторов и образованию свободного водорода. При этом в активную область СИД происходит диффузия водорода и магния, что приводит к образованию дополнительных центров безызлучательной рекомбинации и спаду мощности излучения.

Диффузионная модель оптической деградации СИД на основе двойной гетероструктуры InGaN/GaN в режиме постоянного тока представлена в [66], для импульсного режима работы при повышенной плотности тока с учетом неоднородного распределения температуры по площади активной области – в работах [67, 68].

Авторы [66] рассматривают одномерную кинетическую модель деградации, состоящую из представленных ниже уравнений.

Уравнение баланса для нахождения концентрации неравновесных носителей $n(t)$ в активной области:

$$\frac{J(t)}{ed} - An(t)N_{2av}(t) + Bn(t)^2 = Cn(t)^3 = 0, \quad n(0) = n_0, \quad (1.5)$$

где $J(t)$ – плотность инжекционного тока; A , B , C – безызлучательный, излучательный и Оже-рекомбинационный коэффициент соответственно; e – заряд электрона; n_0 – начальная концентрация носителей; $N_{2av}(t)$ – средняя концентрация примесных атомов в активной области.

Уравнение диффузии примесных атомов:

$$\frac{\partial N_i(x,t)}{\partial t} = D_i \frac{\partial^2 N_i(x,t)}{\partial x^2} - D_i^{el} \frac{\partial N_i(x,t)}{\partial x}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (1.6)$$

где $N_i(x, t)$ – концентрация примесных атомов в i -й области структуры; D_i, D_i^{el} – коэффициенты диффузии и электродиффузии в i -й области; $D_i^{e\varepsilon} = \frac{D_i E q_{eff}}{kT}$; E – напряженность электрического поля; k – постоянная Больцмана; T – температура; $q_{eff} = q_i - |e| \cdot n_e \cdot l_e \cdot \sigma_{in}$ – эффективный заряд [66]; n_e, l_e – концентрация и длина свободного пробега электронов; σ – среднее сечение рассеянных электронов на ионах.

Предложенная авторами [66] модель построена на следующих предположениях: активная область гетероструктуры предполагается однородной средой; рекомбинационные коэффициенты A, B, C не зависят от концентрации n и p , неравновесные концентрации которых в активной области приблизительно равны; при этом, поскольку плотность носителей достигает своего равновесного состояния очень быстро по сравнению со скоростью деградации светодиода авторами рассматривается квазистационарное приближение.

Решение выполнялось численным методом конечных элементов с помощью моделирующей среды COMSOL Multiphysics. В качестве начальных и граничных условий задаются начальные концентрации примесных атомов в рассматриваемых областях структуры и непрерывность плотности потока вещества на внутренних границах структуры.

Плотность инжекционного тока моделировалась функционально зависимостью [66]:

$$J(t) = j_0 \sum_{m=0}^M \left(H \left(t - m \frac{tp}{k} \right) - H \left(t - t_p \left(\frac{m}{k} + 1 \right) \right) \right), \quad (1.7)$$

где $H(t)$ – функция Хэвисайда; M – полное число импульсов в рассматриваемом промежутке времени; m – число импульсов; t_p – длительность импульса; k – коэффициент заполнения.

Для учета эффекта положительной тепловой обратной связи при большой плотности токов расчет коэффициента диффузии D_i и электродиффузии D_i^{el}

проводился исходя из условия неоднородного распределения плотности тока по активной области полупроводниковой структуры СИД и соответствующего ей распределения температуры. С этой целью в работе [66] было проведено тепловое 3D-моделирование структуры СИД и сделан расчет температурного поля с неоднородной плотностью тока по активной области (рисунок 1.19) по методике, представленной в работе [69].

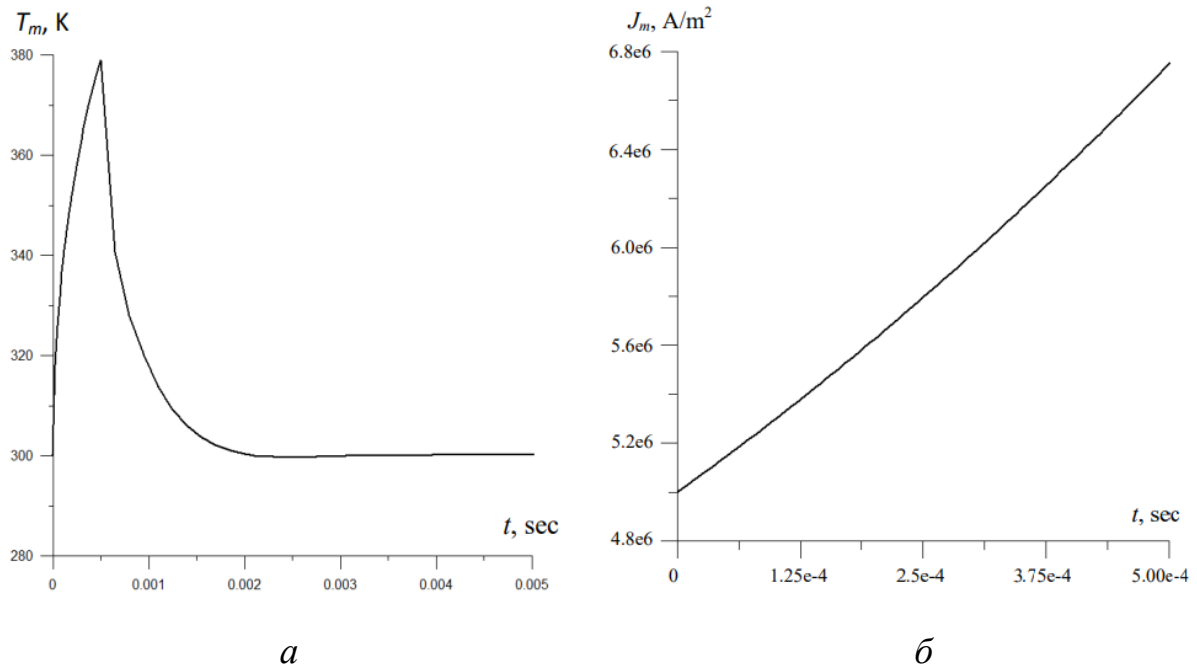


Рисунок 1.19 – Максимальная температура (а) и плотность тока (б) активной области светодиода при $J = 500 \text{ A/cm}^2$, $t_p = 500 \text{ мкс}$, $K = 0,1$

На рисунке 1.19 показаны результаты расчета изменений температуры активной области кристалла (а) и максимальных значений плотности тока (б) за время действия импульса тока для одного из рассчитанных вариантов при $J = 500 \text{ A/cm}^2$; $K = 0,1$; $t_p = 500 \text{ мкс}$.

Из рисунка 1.19 видно, что максимальное значение температуры перегрева активной области относительно температуры, окружающей среды составляет примерно 80 градусов, а максимальная плотность тока возрастает нелинейно и к моменту окончания импульса превышает обычное значение импульса на 35%.

Значение коэффициента диффузии [67] определялось из решения обратной одномерной диффузионной задачи. Для ее решения использовались

экспериментально полученные профили распределения концентрации носителей заряда методом ВФХ на различных временных интервалах деградации СИД.

В результате были получены зависимости падения оптической мощности СИД от времени испытаний (рисунок 1.20).

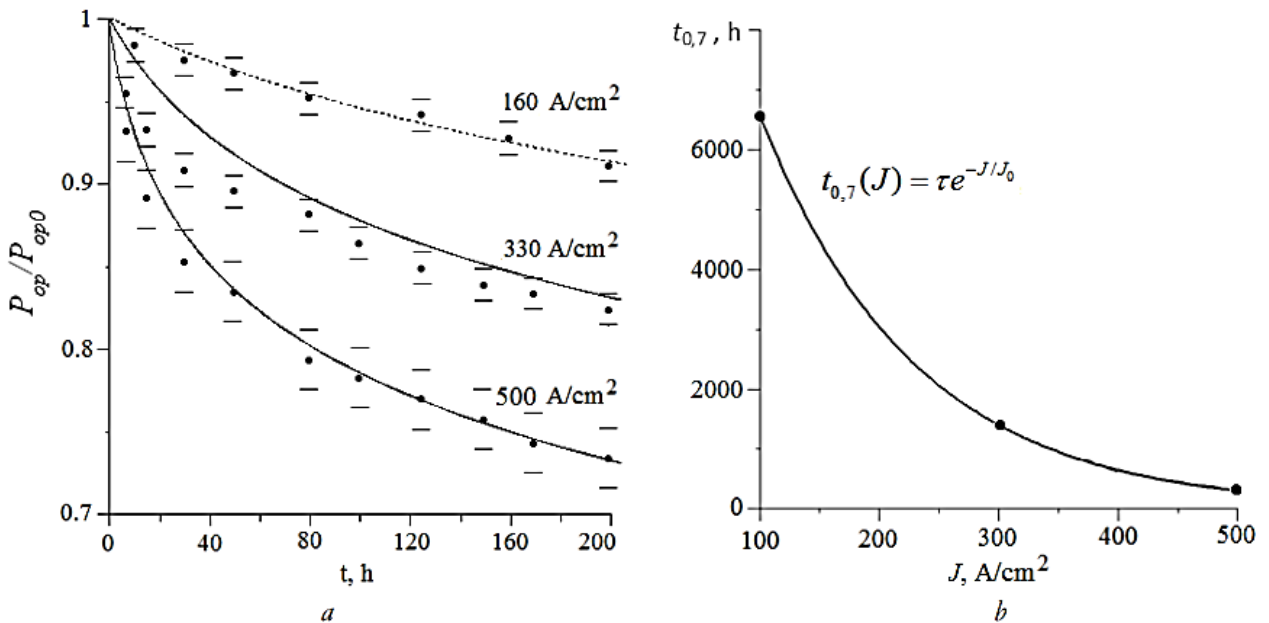


Рисунок 1.20 – Зависимость оптической мощности от времени (а) и зависимость времени спада $t_{0,7}$ оптической мощности до 70% от плотности тока (b) при работе в импульсном режиме

Как видно из рисунка наблюдается хорошее совпадение экспериментальных кривых (показаны точками) и кривых, рассчитанных по диффузионной модели.

В работе [67] авторы доработали эту модель и произвели расчеты с учетом начально неоднородного распределения концентрации дефектов в гетероструктуре. В рамках этой модели также основным процессом, вызывающим спад оптической мощности, является диффузия атомов Mg из барьерного p -слоя в активную область.

При моделировании светодиода с активной площадью S разбивается на совокупность параллельно включенных диодов с разными начальными параметрами.

Эта задача, так же, как и в предыдущем случае, решалась численным методом конечных элементов с помощью моделирующей среды COMSOL Multiphysics. В качестве базового варианта для проведения расчетных исследований использовались светодиоды зеленого свечения производства фирмы Oasistek с размерами кристалла 200×130 мкм.

Согласно результатам расчета, спад оптической мощности излучения светодиода в процессе испытаний существенно зависит от степени неоднородности профиля распределения концентрации дефектов.

Предложенная модель позволяет прогнозировать темп деградации InGaN/GaN светодиодов с различной степенью неоднородности распределения концентрации дефектов и может быть использована для отбраковки дефектных и потенциально ненадежных светодиодов, склонных к ранней деградации.

1.7 Исследование InGaN/GaN структур СИД методами фотолюминесценции и фототока

В работе [70] полученные оптически данные для структуры InGaN/GaN свидетельствуют о присутствии массива квантовых точек (КТ) с различными параметрами, что говорит о неоднородном распределении энергетических уровней для носителей заряда в КТ.

Также было отмечено, что в структурах, выращиваемых на сравнительно недорогих сапфировых подложках высокая концентрация дефектов сильно сказывается на оптических свойствах полученных структур [70]. Путем локализации носителей в КТ даже при концентрации дислокаций 10^9 см^{-3} можно получить эффективные структуры [71].

С увеличением концентрации индия увеличивается глубина уровней квантовых точек. На рисунке 1.21 показана зависимость интенсивности фототока (ФТ) и фотолюминесценции (ФЛ) в зависимости от концентрации индия в активной области структуры [70].

Зависимость этих спектров от температуры представлена на рисунке 1.22, где видно, что увеличивается фототок при уменьшении интенсивности ФЛ. Это объясняется с выходом носителей из локализованного состояния, и увеличением безызлучательной рекомбинации [70].

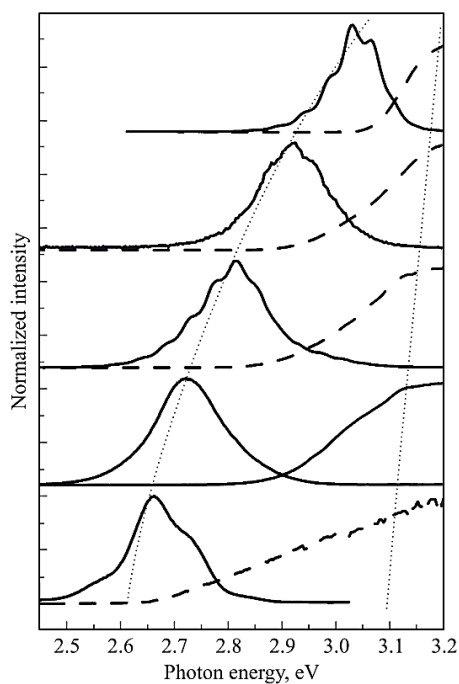


Рисунок 1.21 – Интенсивность ФЛ (сплошные) и ФТ (пунктирные) в зависимости от концентрации индия [70]

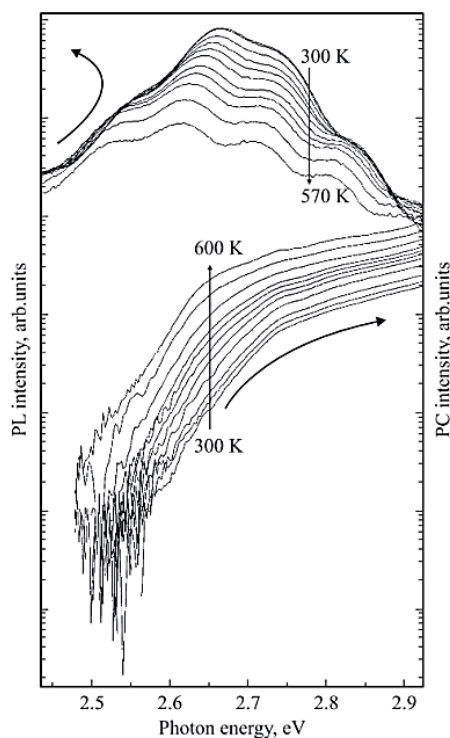


Рисунок 1.22 – Спектры фототока (*PC*) и фотолюминесценции (*PL*) для структур с КТ в зависимости от температуры [70]

Результаты измерения ФЛ при приложении напряжения смещения показаны на рисунке 1.23.

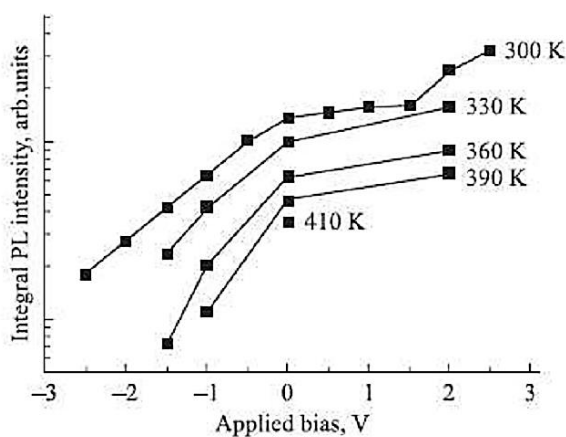


Рисунок 1.23 – Интенсивность фотолюминесценции при разных значениях напряжения смещения и температуры [70]

В работе [72] методом молекулярно-лучевой эпитаксии с использованием аммиака в качестве источника азота исследовано влияние условий роста слоев

InGaN на свойства гетероструктур GaN/InGaN. Также были исследованы профили распределения индия в слоях InGaN, выращенных на GaN при температуре подложки 580 °C с использованием оже-спектроскопии [72]. Было показано [72], что для получения резких гетерограниц и увеличения содержания индия слоях InGaN необходимо поддержание так называемого «смачивающего» слоя металлического индия на поверхности GaN перед и в ходе роста InGaN.

В работе [73] были исследованы структуры, излучающие в ближнем ультрафиолетовом диапазоне на основе GaN с квантовыми точками InGaN в активной области. Было проведено сравнение [73] двух типов структур — с квантовыми точками InGaN в матрице GaN или AlGaN, и показано, что структуры с квантовыми точками в матрице AlGaN термически более стабильны и имеют большую эффективность вследствие большей энергии локализации по сравнению со структурами с квантовыми точками в матрице GaN.

В работе [74] для наноструктур с КЯ InGaN/GaN и GaAs/AlGaAs, легированных Eu была определена корреляция между спектрами ФЛ и структурными параметрами, и было показано, что внедрение редкоземельных ионов приводит к деформациям решетки, при этом в недостаточно совершенных структурах возникают ловушки для неравновесных носителей, что на порядок увеличивает интенсивность ФЛ.

1.8 Исследование структурных свойств активной области

AlGaN/InGaN/GaN светодиодов

В данном параграфе рассмотрено влияние технологических процессов роста на результат формирования структур и их физические свойства.

В работе [75] было исследована зависимость структурных и электролюминесцентных характеристик активной области InGaN/GaN от давления в реакторе при росте методом MOCVD.

Показано [75], что в процессе роста оптимальное давление необходимо определять экспериментально для каждого выращиваемого слоя структуры. Структурные свойства исследовались с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) высокого разрешения, результаты которой изображены на рисунке 1.24 для разных значений давления.

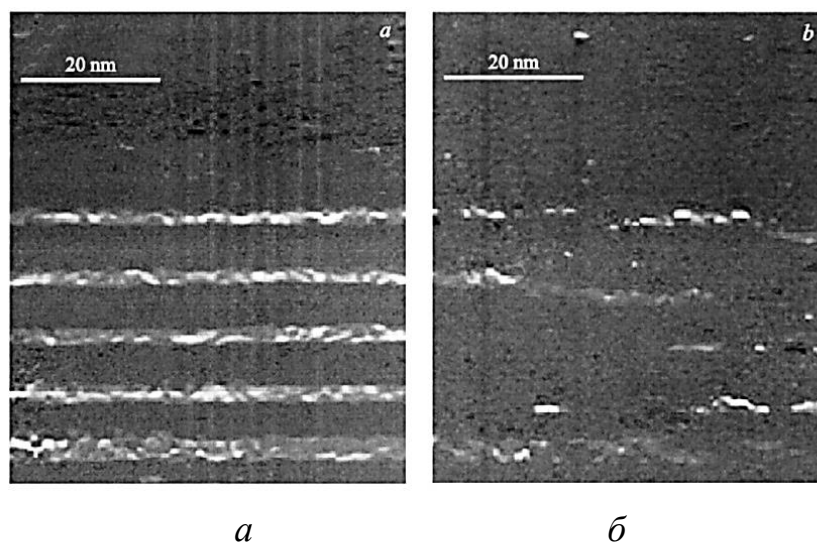


Рисунок 1.24 – Деформации решетки при различных давлениях:
a – 100 мбар; и *b* – 600 мбар [75]

В результате был сделан вывод, что при более высоком давлении, формируются островки, а при давлении 100 мбар слои формируются непрерывно [75].

В работе [76] методами ФЛ и рентгеновской дифракции высокого разрешения проведено исследование многослойных структур $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$, выращенных методом MOCVD. Было отмечено [76], что низкая эффективность вывода света из прибора является одной из основных причин, ограничивающих эффективность InGaAlN светодиодов, выращенных на стандартных сапфировых подложках. Было сказано [76], что использование профилированных сапфировых подложек является перспективным методом решения данной проблемы.

Представленные в работе [77] метод формирования микрорельефа на поверхности сапфировых подложек и свойства выращенных на них слоев GaN и

гетероструктур InGaAlN по мнению автора демонстрируют простую технологию, пригодную для последующего эпитаксиального роста светодиодных структур InGaN/GaN/AlGaN.

На рисунке 1.25,*a* представлено изображение поверхности сапфира после формирования рельефа, оптимизированного для получения большой высоты, и маскирующего массива микрокапель золота и последующего травления, полученное с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) [77].

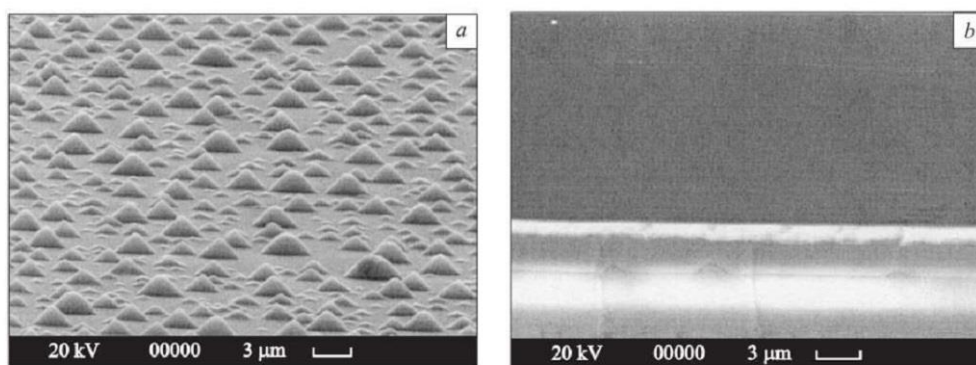
*a**б*

Рисунок 1.25 – РЭМ изображение поверхности профилированной сапфировой подложки (*a*) и скола структуры GaN/профилированный сапфир (*б*) [77]

В работе [78] было проведено исследование свойств сверхрешеток InGaN/GaN, полученных методом периодического прерывания роста слоя InGaN с подачей водорода в реактор, и было показано, что полученные структуры обладают заданной периодичностью, при этом полученные не сплошные слои GaN авторами объясняются неоднородностью конвертации поверхности InGaN в момент прерывания роста. Полученные данные [78] свидетельствуют о том, что исследованные сверхрешетки могут применяться в активной области светодиодных структур для обеспечения вертикального транспорта носителей благодаря модификации их энергетического спектра с изменением числа периодов.

Представленные в работе [13] результаты экспериментального исследования температурных полей, возникающих в AlGaInN гетероструктурах мощных светодиодов в результате саморазогрева при больших рабочих токах, методом инфракрасной тепловизионной микроскопии с высоким разрешением показали, что при высоких уровнях возбуждения могут возникать значительные температурные градиенты, обусловленные неоднородностью в распределении плотности тока по площади активной области, что в итоге необходимо учитывать, как при конструировании кристаллов СИД, так и при оценке допустимых режимов эксплуатации. Также было отмечено [13], что данный метод позволяет также выявлять микродефекты, связанные с каналами токовой утечки и снижающие надежность работы приборов (рисунок 1.26).

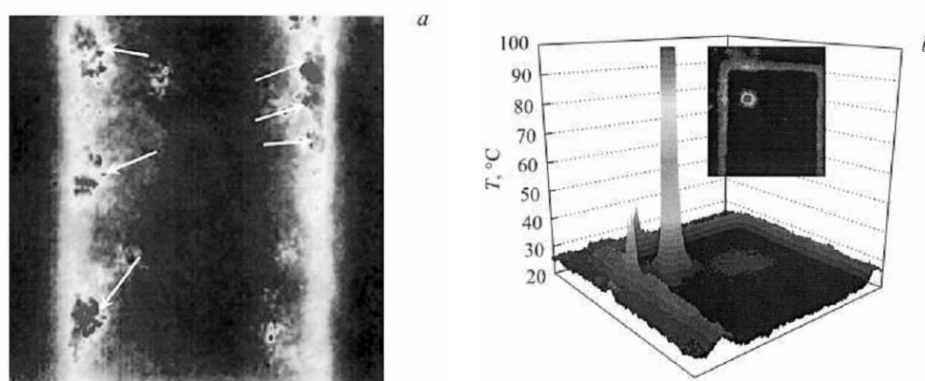


Рисунок 1.26 – Каналы токовой утечки, вызванные дефектами структуры:
a – цифровая инфракрасная фотография каналов токовой утечки по поверхности с локально перегретыми областями; *b* – температурный «mapping» после статического микропробоя [13]

В работе [79] с помощью просвечивающей электронной микроскопии были исследованы деформации в активной области структур светодиодов со сверхрешетками (рисунок 1.27) [79].

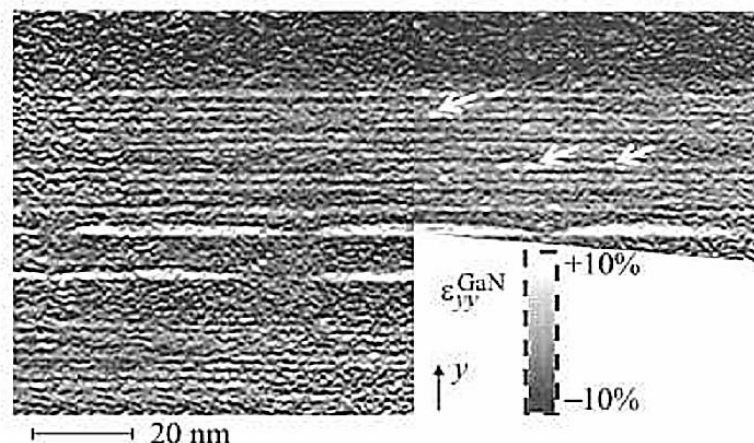


Рисунок 1.27 – Распределение деформации в активной области структуры [79]

Среднеинтенсивный серый тон на рисунке 1.27 соответствует ненапряженным областям GaN, а градации серого отображают численные отклонения деформации от нулевого значения.

В работе [80] рассматривались структуры зеленых светодиодов. Эпитаксиальные структуры выращивались на сапфировых подложках методом МОС-гидридной эпитаксии. Было отмечено, что независимо от количества КЯ практически весь процесс рекомбинации протекает в КЯ, которая ближе к р-области при плотности тока, характерной для данных светодиодов.

Отмечено, что концентрация индия увеличивается по мере роста, несмотря на то, что условия роста одинаковые. Авторы предположили, что в исследуемых структурах происходит частичная релаксация напряжений, нарастающая с увеличением числа КЯ. Обнаружено появление дополнительных дислокаций в активной области структуры (рисунок 1.28).

В структурах с большим содержанием индия концентрация дислокаций в активной области может достигать 10^{10} см [80].

Также было отмечено, что концентрация индия и ее флуктуации увеличивается для каждой последующей КЯ (рисунок 1.29) [80].

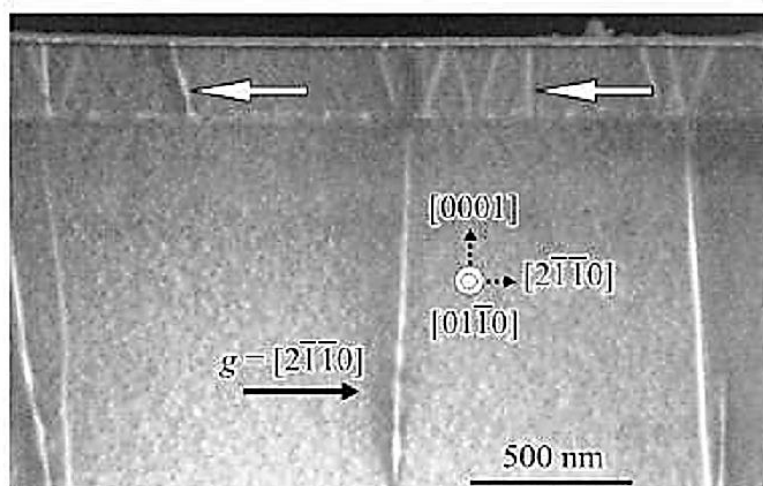


Рисунок 1.28 – Изображение части структуры с тремя КЯ [80]

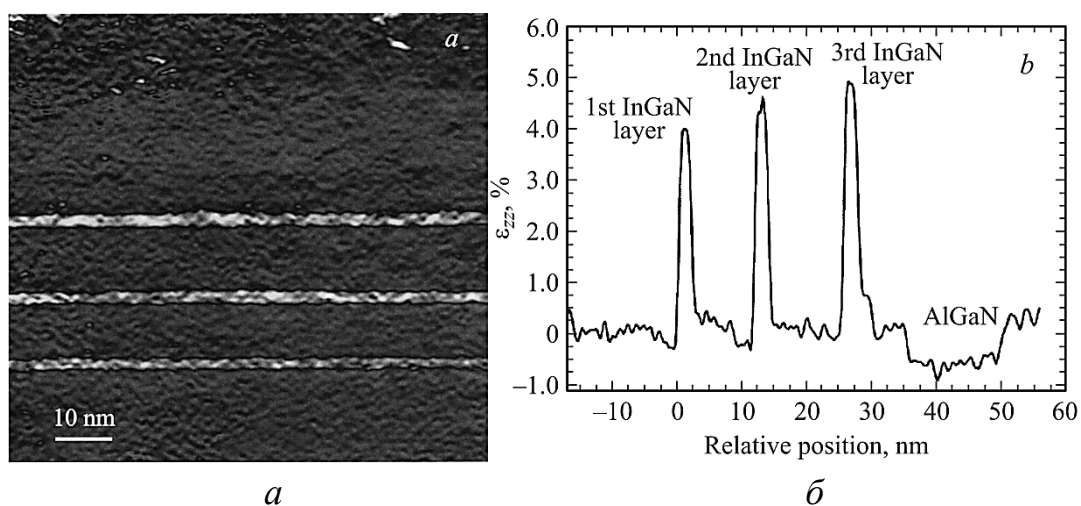


Рисунок 1.29 – Распределение деформаций решетки (a) и в направлении роста (b) [80]

Таким образом, увеличение концентрации индия приводит к увеличению плотности дислокаций, однако даже в этом случае за счет локализации носителей на флуктуациях индия позволяет получить допустимую эффективность излучения.

1.9 Выводы

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 деграционных 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 ЭЛ.

Что касается механизмов и моделей электрической деградации гетероструктур на основе InGaN/GaN, то превалируют модели деградации, описывающие спад светового потока в зависимости от времени испытаний (например, диффузионная модель), а не процессы генерации дефектов.

Таким образом, исследование такой, казалось бы, значимой оптической характеристики светодиодных структур как световой поток и его изменение в зависимости от времени наработки (именно с целью выявления физических процессов в условиях слабых токов) не было проведено в достаточной мере из-за слабой информативности [22].

Результаты исследования зависимости степени деградации от наработки путем фиксации оптических параметров, наблюдением за спектрами не способны объяснить все происходящие процессы в структуре.

Поэтому существует актуальность в совершенствовании методик контроля интенсивности деградационных процессов, основанных на исследовании механизмов деградации определяющих характеристик.

Некоторые авторы [30, 35] предполагают, что информацию о динамике деградационных явлений и дефектообразования в синих гетероструктурах на основе GaN несут такие характеристики, как ширина спектрального распределения, сдвиги максимума спектров после наработки, вольтамперные характеристики и т.д.

На основании проведенного литературного обзора сделан вывод об основных физических механизмах электрической и оптической деградации СИД.

1. Токи, протекающие через СИД, неоднородны по площади, поэтому сопровождаются локальным перегревом, что является дополнительным фактором, усиливающим деградационные процессы, приводящие СИД к «отказам».

2. Важную роль в деградационных явлениях отводится протяженным дефектам, в частности дислокациям, пронизывающим активную область гетероструктуры СИД.

3. Генерация точечных дефектов в процессе длительного протекания токов большой плотности (механизм подпороговой генерации дефектов) приводит к тому, что они захватываются протяженными дефектами. При этом создается своеобразная атмосфера вокруг протяженного дефекта, способствующая процессам электротермодиффузии и развитию деградационных процессов.

4. Наиболее эффективным способом контроля нарастания концентрации точечных дефектов являются спектры свечения, возникающие при туннельно-рекомбинационных явлениях и наблюдаемые в СИД с одной КЯ при малых напряжениях и токах, когда p - n -переход еще практически закрыт и все внешнее электрическое напряжение приложено к активной области СИД.

5. Токи, протекающие в таких условиях, чувствительны к возрастанию концентрации точечных дефектов и несут информацию о тонких механизмах деградационных явлений: созданию и разрушению электрических диполей на границах квантовых ям и барьерных слоев, созданию и разрушению мостиков омической электропроводности и т. д. Что способствует выяснению механизмов и кинетики деградационных явлений.

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).

1.10 Постановка целей и задач исследования

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

Основные задачи исследования

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.

2 ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕЧЕНИЯ СВЕТОДИОДОВ НА ОСНОВЕ INGAN/GAN С МКЯ В ДИАПАЗОНЕ ТОКОВ (10^{-9} – 10^{-6}) А

2.1 Объекты исследования и методика эксперимента

В качестве объекта исследования использовались синие сверхъяркие AlGaIn/InGaIn/GaN светодиоды в корпусе без люминофора фирмы SemiLEDs малой и средней мощности с чипом SL-V-B24AD, а также синие сверхъяркие светодиоды средней мощности модели «Rebel LXML-PB01-0040», выполненные по технологии Flip-Chip. Светодиоды имеют номинальную величину рабочего тока, равную 300 мА при напряжении не более 3 В и площади кристалла СИД, равной 1 мм². Кристаллы светодиодов размещены на теплоотводах с площадью, достаточной для эффективного отведения тепла.

Поскольку требуется не просто исследовать электрооптические характеристики свечения СИД, а уловить мельчайшие изменения этих характеристик в зависимости от времени и режима испытания, а также изменения, которые могут возникнуть внутри и на поверхности кристалла, в первую очередь в оптический модуль необходимо включить устройства оптической микроскопии с возможностью фиксации получаемых изображений, как в обычном режиме, так и в режиме длительной экспозиции. Также немаловажным фактором работы СИД является выделяемое в кристалле тепловое излучение, которое можно зафиксировать устройствами инфракрасного диапазона. Таким образом, в экспериментальную установку вошли следующие приборы:

- прецизионный измеритель RLC Keysight E4980A;
- микроскоп Альтами PC0745;
- цифровая фотокамера ECМOS01200KPA (в комплекте с микроскопом) для исследования и фотографирования поверхности кристалла и свечений малой интенсивности;
- цифровая фотокамера Nikon D90 для исследования и фотографирования свечений сверхмалой интенсивности в режиме длительной экспозиции.

– тепловизор Tiesto 876 для контроля температуры кристалла и корпуса СИД в процессе испытаний.

На рисунке 2.1 изображена структурная схема установки, а на рисунке 2.2 представлен внешний вид экспериментальной установки.



Рисунок 2.1 – Структурная схема установки

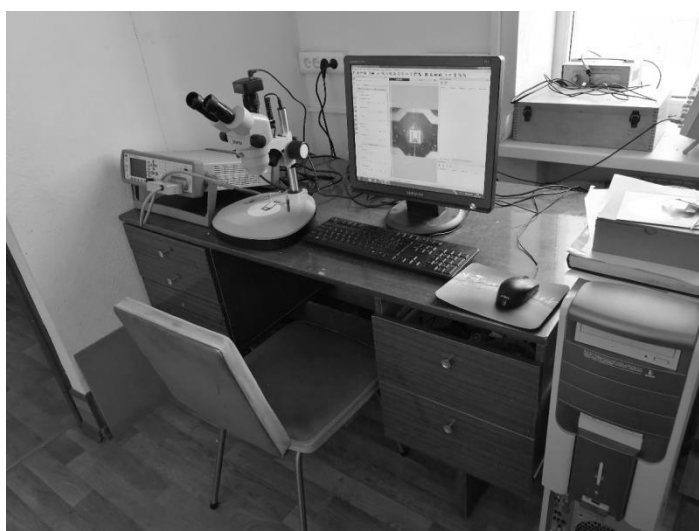


Рисунок 2.2 – Внешний вид экспериментальной установки

Используемые для анализа спектральных характеристик туннельно-рекомбинационного свечения цифровые изображения слабого свечения гетероструктуры СИД были получены посредством фотографирования светящегося образца с помощью микроскопа и установленной на штатив цифровой фотокамеры высокой чувствительности и высокого разрешения.

Вначале производится фотографирование исследуемого образца СИД до испытаний, а потом – после испытаний.

При этом в процессе фотографирования на образец подается напряжение от прецизионного источника-измерителя в диапазоне 0,7–2,3 В в зависимости от чувствительности фотокамеры. Именно в этих условиях наблюдается структурно-чувствительное туннельно-рекомбинационное свечение.

После первого фотографирования (до испытаний) также проводится измерение прямых ВАХ в области микротоков нового образца СИД. Как известно, при прямом напряжении более 2,5 В в СИД на основе GaN возникает инжекционная электролюминесценция (когда открывается *p-n*-переход). Когда приложенное к СИД напряжение находится в диапазоне 2–2,5 В и *p-n*-переход практически закрыт в СИД должно наблюдаться туннельно-рекомбинационное излучение [18, 30]. В данной работе измерения ВАХ проводились в указанной области, когда через образец протекали токи в диапазоне 10^{-9} – 10^{-6} А, так как именно в этой области будут возникать наибольшие изменения. Используемый для измерений ВАХ прецизионный измеритель RLC Keysight E4980A позволяет измерять токи, начиная с 10^{-12} А.

Испытания проводились при различных значениях (номинальные, повышенные в стрессовом режиме и пониженные) температуры, рабочего тока и напряжения. Количество циклов испытание-фотографирование, длительность испытаний и экспозиции фотографирования не ограничены и обусловлены получением требуемого результата. Описание установки и методики эксперимента опубликовано в работах [81, 82].

2.2 Исследование картин свечения в зависимости от напряжения

Одним из эффективных методов контроля динамики накопления дефектов в гетероструктурах InGaN/GaN является определение изменений спектра туннельного излучения [18,30] при напряжениях прямого смещения менее 2,4 В и токах в диапазоне 10^{-9} – 10^{-6} А в зависимости от времени испытаний. Однако ранее исследования спектров туннельно-рекомбинационного излучения были проведены для СИД с одной КЯ. В СИД с множественными квантовыми ямами (МКЯ) туннельная компонента свечения на 3–4 порядка меньше, чем в диодах с одной квантовой ямой [18]. Поэтому это слабое свечение невозможно не только увидеть, но и зарегистрировать стандартной аппаратурой. А для измерения спектра потребуется еще более чувствительная аппаратура. Тем не менее, установленная связь интенсивности туннельно-рекомбинационного свечения с изменениями дефектной структуры СИД вызывает большой научный и практический интерес.

С этой целью было проведено исследование не спектров, а интегрального свечения СИД с МКЯ при малых рабочих токах, т.к. при выделении спектральных полос потребуется еще более чувствительная аппаратура.

Однако даже регистрация свечения при токе в диапазоне (10^{-9} – 10^{-6}) А оказалась сложной задачей. Фотографии такого свечения удалось получить только при длительных экспозициях фотографирования от нескольких секунд до десятков минут в зависимости от конструкции СИД. На рисунке 2.3 показаны микрофотографии картин сверхслабого свечения СИД с МКЯ, полученные при протекании через гетероструктуру нано и микротоков.

Из рисунке 2.3 видно, что наблюдаемое свечение имеет сплошную и точечную структуру, кроме того, интенсивность и цветность его неоднородно по площади поверхности гетероструктуры. Судя по тому, что цвет сплошной составляющей меняется с увеличением приложенного напряжения можно предположить, что наблюдаемое свечение имеет туннельно-рекомбинационную

природу, как и в случае СИД с одной квантовой ямой, в которых максимум спектра сдвигался с увеличением напряжения в область больших энергий [18, 30]. Для лучшего понимания происходящих процессов в гетероструктуре следует рассмотреть ее зонную диаграмму из работы Бочкаревой и др. [17], которая наилучшим образом подходит для описания данных процессов.

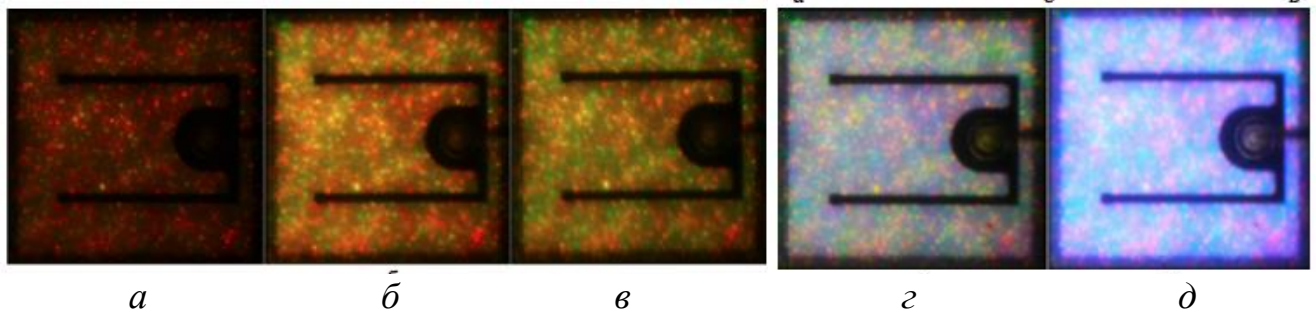


Рисунок 2.3 – Фотографии картин сверхслабого свечения СИД при длительной фотоэкспозиции в зависимости от напряжения/тока:

$a - 2,0 \text{ В} / 70 \text{ нА}$; $\bar{b} - 2,1 \text{ В} / 0,25 \text{ мкА}$; $\bar{в} - 2,2 \text{ В} / 1 \text{ мкА}$;

$\bar{г} - 2,3 \text{ В} / 5 \text{ мкА}$; $\bar{д} - 2,4 \text{ В} / 20 \text{ мкА}$

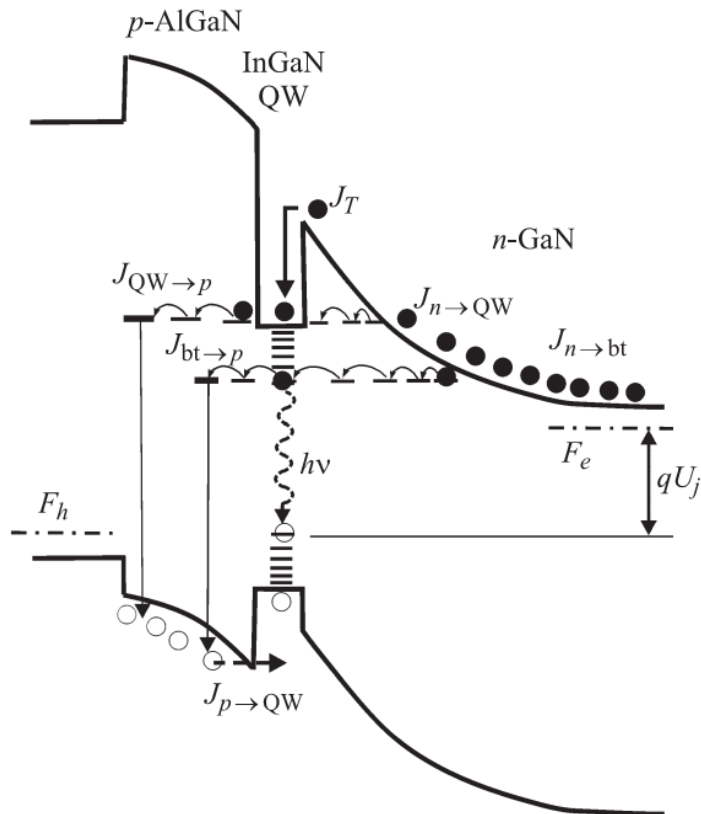


Рисунок 2.4 – Иллюстрация протекания туннельно-рекомбинационных и надбарьерных токов в p - n -структуре на основе GaN [17]

По-видимому, цвет сплошной составляющей обусловлен туннельно-рекомбинационными процессами с участием хвостов состояний и уровней дефектов под квантовыми ямами [10]. 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 В.Е. Кудряшова и А.Э. Юновича [18], где проводились измерения спектра и рассматривался механизм туннельной излучательной рекомбинации в СИД с одной квантовой ямой.

Таким образом, доказано первое защищаемое научное положение: «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».

Анализ точечной составляющей свечения показал, что с увеличением напряжения увеличивается количество светящихся точек, причем вначале появляются точки красного цвета, потом по мере увеличения напряжения последовательно добавляются точки других цветов: оранжевого, желтого, зеленого. После появления цвет и площадь отдельных точек этой компоненты свечения от напряжения не меняются. По-видимому, точечная составляющая связана с туннельно-рекомбинационными процессами через квантовые ямы, поскольку яркость точечной составляющей существенно выше фоновой (сплошной). Цвет точечной составляющей свечения и его наличие обусловлены туннельно-рекомбинационными процессами с участием квантовых ям с неоднородным содержанием индия, приводящим к флуктуации потенциала и ширины запрещенной зоны по плоскости квантовой ямы.

Расположение точек свечения отражает флуктуации стехиометрического состава слоев InGaN по площади, а цвет излучения точек связан с рекомбинационными процессами в участках пленки с различной глубиной потенциальных ям. В работе [42] это связывают с флуктуациями концентрации индия, приводящее к возникновению сегментированных квантовых ям, квантовых островков и квантовых точек внутри активных слоев.

Что касается точечной составляющей свечения, то цвет и площадь точечной компоненты от напряжения не меняются.

Таким образом, картины данного сверхслабого свечения позволяют визуально выявлять планарное распределение концентрации точечных и линейных дефектов, наличие слоев сегментированных квантовых ям, квантовых островков и квантовых точек внутри активных слоев [11, 42, 83, 84], обусловленных флуктуациями концентрации индия, т.е. недостатками технологии изготовления гетероструктуры СИД (входной контроль) и динамикой деградационных процессов во время испытаний.

Что касается гораздо более слабой интенсивности обнаруженного свечения в СИД с МКЯ по сравнению с туннельно-рекомбинационным свечением в светодиодных структурах с одной квантовой ямой [18, 30], то можно сказать следующее. Как показано в [18, 30], при малых напряжениях, когда p - n -переход еще закрыт в активной области СИД с одной КЯ существует высокая напряженность электрического поля, при которой могут наблюдаться процессы туннелирования электронов в активную область. В СИД с МКЯ ширина активной области существенно увеличивается, напряженность электрического поля уменьшается, а значит, будет уменьшаться и интенсивность туннельных процессов.

Очевидно, если в процессе изготовления СИД с МКЯ использовалась разная технология, дизайн или архитектура и при этом увеличивалась ширина активной области и уменьшалась флуктуация концентрации индия, то интенсивность и характер туннельно-рекомбинационного свечения будет изменяться (уменьшаться

яркость фонового свечения, яркость и цвет точечной составляющей, а также количество точек).

Такие же эксперименты были проведены на и светодиодах повышенной мощности SL-V-B45AK Semileds. При исследовании «свежих» образцов свечение туннельно-рекомбинационной природы СИД также было зафиксировано в диапазоне 2–2,4 В, но значительно слабее по интенсивности, требующее при его фотографировании существенно большей фотоэкспозиции (от 10 до 30 минут).

Аналогичные результаты были получены и на сверхярких СИД, изготовленных по технологии Flip-Chip, однако для регистрации картин сверхслабого свечения при напряжениях менее 2,1 В в СИД с данной конструкцией требуется еще большее значение фотоэкспозиции. На рисунке 2.5 представлены картины сверхслабого свечения для Flip-Chip светодиода при напряжении 2,3В (рис. 2.5 *a*), и при напряжении 2,05 В (рис. 2.5 *b*), где видна выраженная неоднородность распределения свечения по поверхности кристалла.

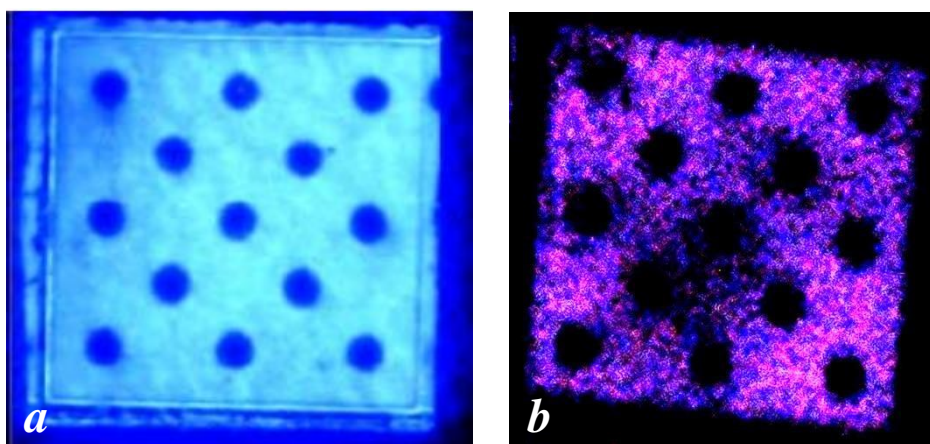


Рисунок 2.5 – Картины свечения flip-chip светодиода при напряжении: *a* – 2,3 В; *b* – 2,05В

Как видно из рисунка 2.5, у flip-chip светодиодов также наблюдается неоднородность распределения свечения по площади кристалла, однако ввиду изменения технологии изготовления образца, для регистрации свечения при меньших напряжениях требуется более чувствительная фотоаппаратура и значительно более длительная фотоэкспозиция.

Как показали эксперименты, картины свечения индивидуальны для каждого образца СИД из одной серии и существенно отличаются для СИД, имеющих разную архитектуру и дизайн, изготовленных по разной технологии и разных производителей. Интенсивность и цветность данного свечения зависит от условий при которых осуществляются ТРП: величина напряженности 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.

2.3 Описание программного обеспечения для анализа картин свечения

Была произведена обработка полученных картин свечения на специально разработанном программном обеспечении (ПО), предназначенном для подсчета количества пикселей определенных цветов и вывода их процентного соотношения. На программу получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (Приложение Б).

Сначала в программе указывается путь к анализируемому изображению, задаются минимальные и максимальные значения тонов исследуемых цветов, далее настраиваются точность – насыщенности и яркости и количество обрабатываемых пикселей за шаг. Затем нажатием кнопки Start запускаем программу. Программа считывает ширину и высоту изображения в пикселях с последующим проходом по пикселям в цикле и в нижних ячейках счетчики количества цветов выводят процентное и количественное значения цветов. С помощью кнопки View есть возможность посмотреть обработанное изображение. На рисунке 2.6 представлен пользовательский интерфейс разработанной программы.

Перед началом обработки изображений настраиваем параметры ПО: начальные и конечные значения интервала цветов, значения берутся из шкалы

оттенков цветовой модели HSB-HUE, которая представлена круговой диаграммой на рисунке 2.7, Accuracy (точность) – указывается минимальное допустимое значение для координат цвета S и B (Saturation – насыщенность, Brightness – яркость), PPS – промежуток обрабатываемых пикселей [85].

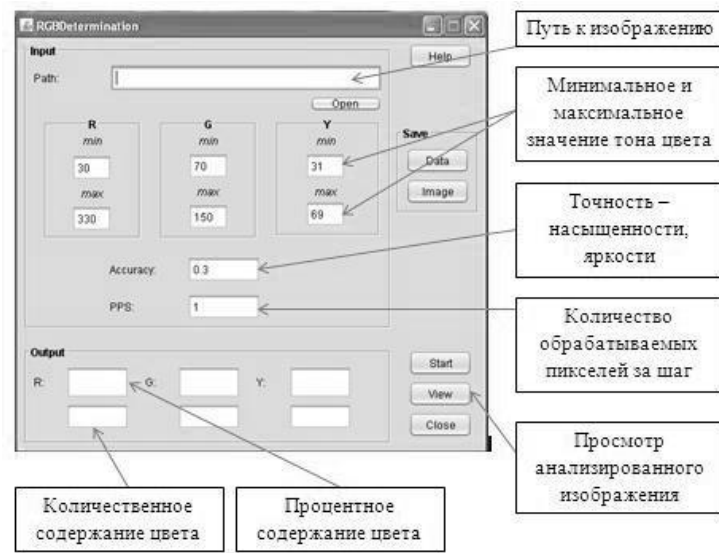


Рисунок 2.6 – Пользовательский интерфейс программы

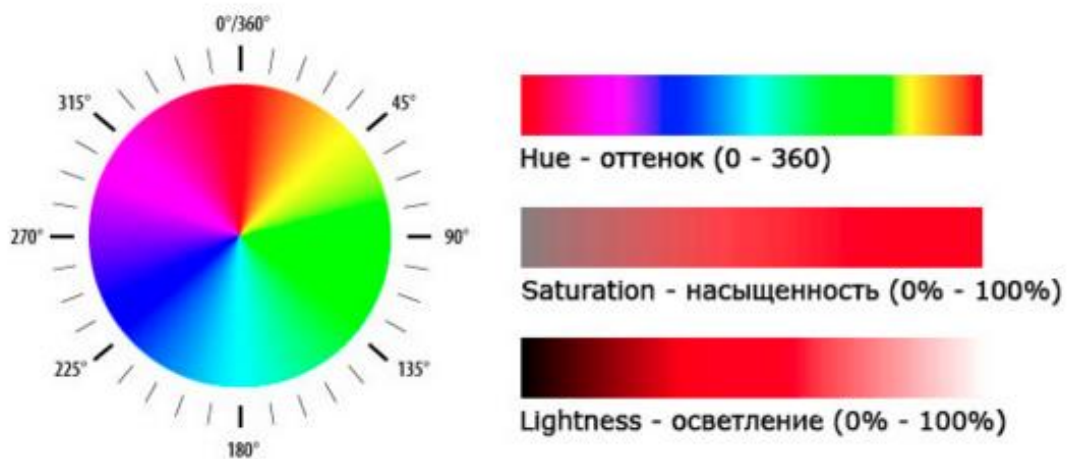


Рисунок 2.7 – Шкала оттенков цветовой модели HSL

Мы настраивали программу так, чтобы захватить яркие области и их фоны, так как они несут информацию о деградации структуры. Подобранные параметры ПО представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Параметры ПО

	Красный	Зеленый	Желтый
Начальное значение	40	60	50
Конечное значение	330	160	60

Демонстрация работы ПО

Рассмотрим пример обработки изображения излучения СИД [86]. Минимальные и максимальные значения тонов исследуемых цветов представлены в таблице 2.1. Результат анализа картины представлен на рисунке 2.8, области зеленого, красного и желтого цветов закрашены (выделены).

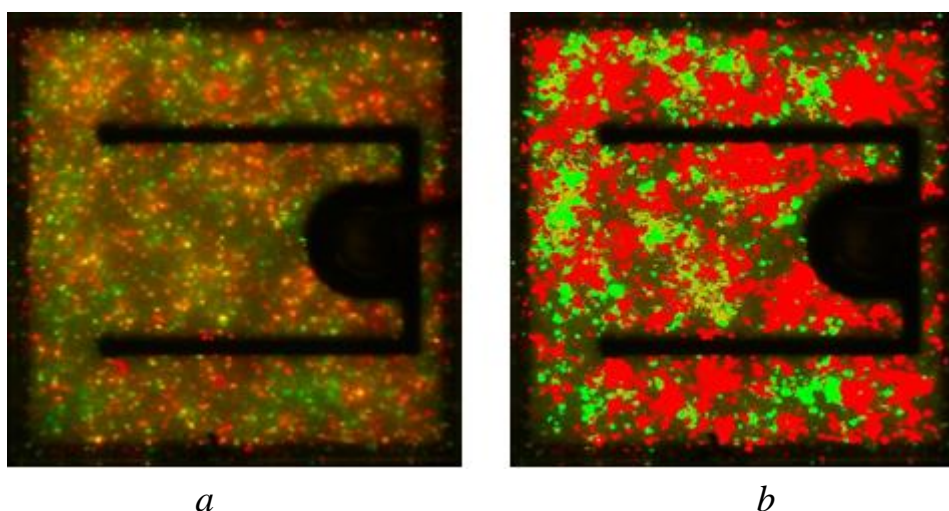


Рисунок 2.8 – Картины излучения СИД при напряжении $U = 2,1$ В до и после анализа в ПО

В таблице 2.2 приведены процентное соотношение и количественное значение цветов.

Таблица 2.2 – Результаты анализа в ПО

Количество пикселей на каждый цвет, кол-во / %		
Красный	Зеленый	Желтый
3456004 / 71	648845 / 13	735040 / 15

Программное обеспечение является точным инструментом для определения цветового состава изображения и может применяться для анализа изменения оптических характеристик переходных процессов.

На рисунке 2.9 представлены картины излучения СИД при прямом напряжении смещения $U = 2,1$ В до и после обработки в ПО в зависимости от времени испытаний.

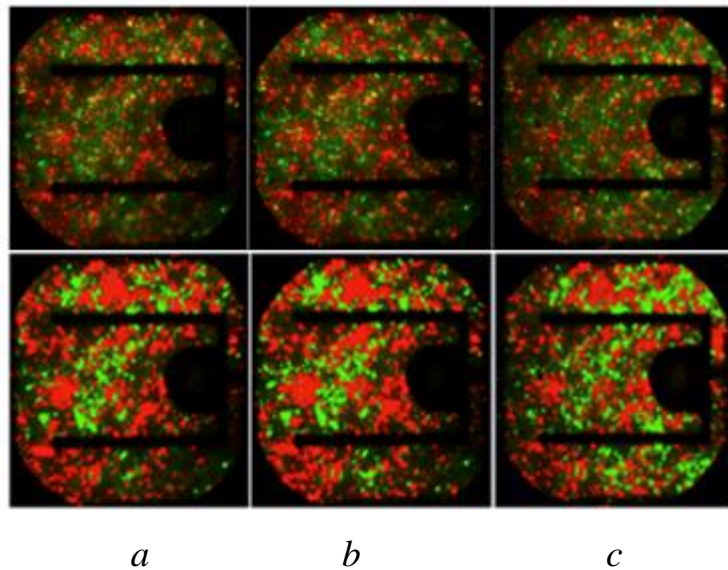


Рисунок 2.9 – Картины туннельной электролюминесценции СИД до (сверху) и после (снизу) анализа в ПО в зависимости от времени испытаний:

a – до испытаний; *b* – после 33 ч; *c* – после 84 ч

После испытаний 33 часа наблюдается увеличение площади сплошных составляющих красного, зеленого и желтого цветов, а изменение свечения точечных составляющих не прослеживается, что отражают планарное распределение квантовых ям (точек), которые обусловлены флуктуацией стехиометрического состава пленки, а цвет излучения квантовых ям с их глубиной, а значит флуктуацией концентрации индия.

После испытаний 84 часа наблюдается увеличение сплошной составляющей зеленого цвета и уменьшение сплошной составляющей красного цвета, но точечные составляющие не изменились, что доказывает связь с квантовыми

ямами (см. рисунок 2.9,с). Увеличение сплошной составляющей зеленого цвета мы связываем с начальной стадией развития деградационных явлений.

На рисунке 2.10 представлен график изменения площади сплошных составляющих в пикселях в зависимости от времени испытаний.

Также в таблице 2.3 приведены результаты анализа в виде процентного соотношения и количественного содержания цветов картины свечения до и после испытаний.



Рисунок 2.10– Зависимость количества пикселей от времени испытаний
(1 – зеленый цвет; 2 – желтый цвет)

Таблица 2.3 – Зависимость цветового распределения в картинах свечения от испытаний

Время испытаний, ч	Красный	Зеленый	Желтый
	кол-во / %		
0	1254466 / 73	378284 / 22	74469 / 4
33	2599608 / 72	827725 / 23	164284 / 5
84	2214198 / 62	1162147 / 33	186556 / 5

Следует учитывать, что красный цвет входит в состав оттенков остальных цветов (их формирование) в системе RGB. Кроме того, основной цвет фона в туннельно-рекомбинационном излучении зависит от напряжения. При увеличении напряжения на гетероструктуре фоновый цвет будет сдвигаться в область больших энергий, см. раздел 2.2. Вследствие этого, динамику накопления

дефектов следует определять по возрастанию количества пикселей желто-зеленого цвета при основном цветовом фоне, отличном от желто-зеленой области спектра.

Например, в первоисточнике [30] для анализа спектральной полосы СИД с одной квантовой ямой использовался прием выравниваний амплитуды основной полосы (синий цвет) до и после испытаний.

Для повышения точности пиксельного анализа туннельно-рекомбинационного свечения следует как можно точнее выставлять напряжение на СИД после проведения испытаний такое же, что было установлено при фотографировании картины свечения до проведения испытаний.

Использование прецизионного источника-измерителя Keysight упрощает такую задачу, т.к. с его помощью можно устанавливать напряжение на СИД с точностью до четвертого знака после запятой.

Таким образом, доказано второе защищаемое научное положение: «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».

2.4 Исследование картин свечения при долговременных испытаниях

Далее представлены результаты исследования динамики изменения картин сверхслабого свечения СИД средней мощности марки SL-V-B24AD при более

длительных испытаниях. Испытания проводились при комнатной температуре и номинальном значении рабочего тока на СИД, расположенных на радиаторах с площадью, рекомендованной производителем. Динамика изменения картин сверхслабого свечения для СИД средней мощности в зависимости от времени испытания представлена на рисунок 2.11.

Как видно из рисунка 2.11, помимо изменений фонового излучения изменения произошли и в точечной составляющей ТРС.

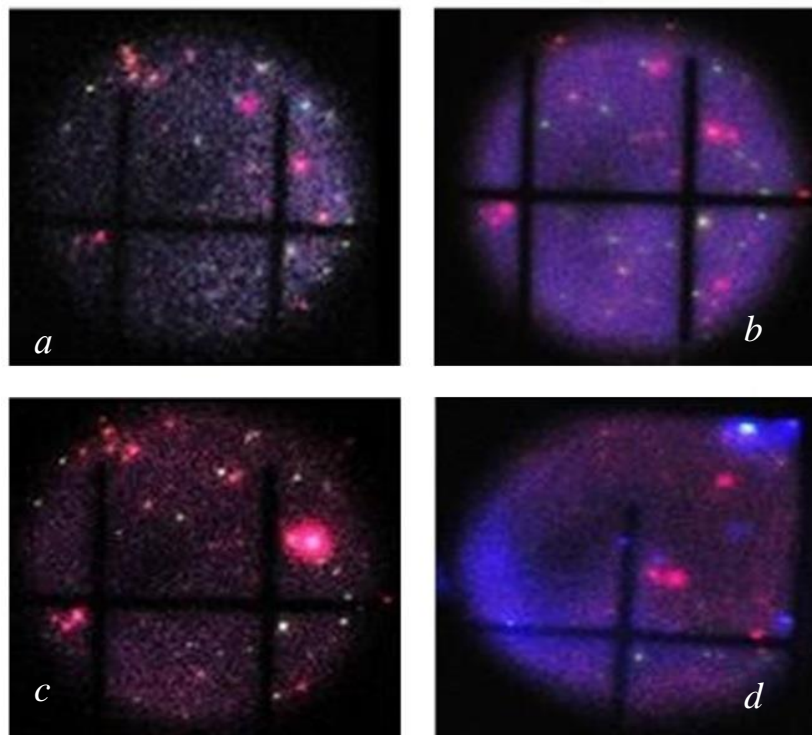


Рисунок 2.11 – Картины свечения СИД в зависимости от времени испытания образца: *a* – 0 ч; *b* – 480 ч; *c* – 960 ч; *d* – 1280 ч

Размер пятен от времени испытания возрастает, наблюдается 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 [84]. 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 динамика увеличения

площади соответствует изменению сопротивления СИД. Можно предположить, что «мостики» омического сопротивления возникают в местах формирования шнуров повышенной электропроводности [87].

Также из рисунка 2.11,*d* видно, что на картине туннельной ЭЛ появляются синие пятна. Одно из синих пятен появилось в ареоле бывшего большого красного пятна (рисунок 2.11,*c*).

Далее, после 1280 часов испытаний при номинальном значении тока этот же образец был подвергнут кратковременному (несколько минут) термотоковому стрессу. Такое воздействие возникает при повышении величины рабочего тока до такого значения, при котором температура кристалла СИД превышает максимально допустимую величину в 125 градусов Цельсия. Измерение температуры кристалла проводилось с помощью тепловизора.

На рисунке 2.12 приведена картина ТРС СИД после термостресса – испытания при такой величине рабочего тока, когда температура кристалла повысилась до 139,5 °С, что больше предельной рабочей температуры [88].

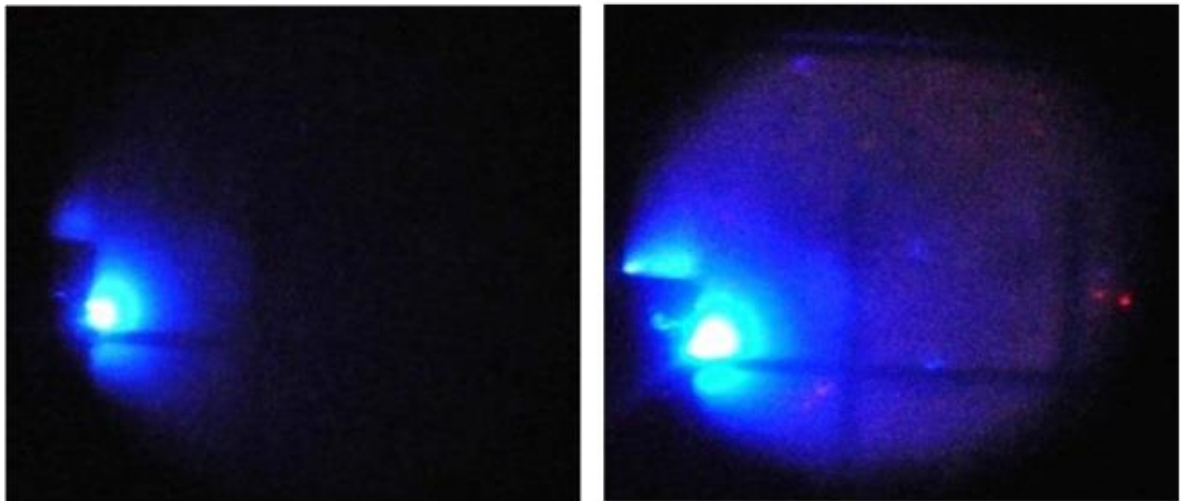
*a**б*

Рисунок 2.12 – Картины свечения СИД в зависимости от приложенного напряжения после частичного «прокола» гетероструктуры:

a – 0,7 В; *b* – 1,3 В

После таких испытаний свечение возникало в виде синего пятна при гораздо более низком напряжении (начиная от 0,7 В) (см. рисунок 2.12). При повышении напряжения до 1,3 В площадь и яркость свечения увеличивается. Становится видно, что оно возникает вблизи электродов. Такое состояние гетероструктуры назовем «проколом». Подробнее о явлениях, приводящих к «проколу» гетероструктуры изложено в главе 3.

На рисунке 2.13 изображена картина туннельной электролюминесценции СИД после термостресса гетероструктуры.

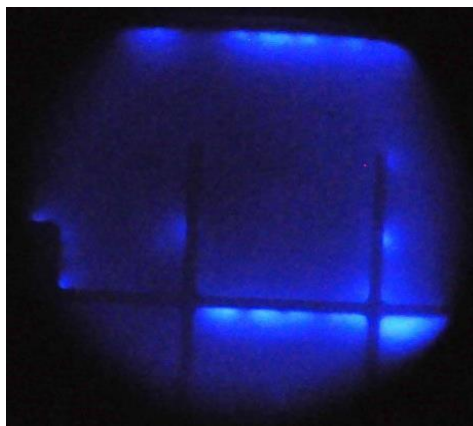


Рисунок 2.13 – Картина туннельной электролюминесценции СИД после термостресса гетероструктуры при напряжении $U = 2,0$ В

При повышении напряжения до 2 В свечение возникает и в отдалении от электродов. Далее, при повышении напряжения до номинального значения СИД начинает светиться в полную силу (как и до испытаний).

Таким образом, изменения электрооптических характеристик СИД за 1280 часов испытаний и кратковременный термотокковый стресс привели лишь к начальной стадии деградации, которая еще не приводит к значительному уменьшению яркости [7] (т.к. яркость в рабочем режиме еще существенно не упала).

В связи с этим, данный метод можно применять для ранней диагностики будущих катастрофических изменений, которые приведут к более значительной потере яркости.

Выводы по главе

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

2. Цвет сплошной составляющей свечения в InGaN/GaN гетероструктуре СИД с МКЯ соответствует энергии излучаемого кванта света $h\nu \approx eU$, а цвет точечной составляющей обусловлен туннельно-рекомбинационными процессами с участием КЯ с неоднородным содержанием индия.

3. 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.

4. Разработанное ПО позволяет произвести пиксельный анализ слабых микроисточников в автоматизированном режиме. Разработанная методика анализа точечных и сплошных составляющих фотографий ТРС представляет в основу метода контроля флуктуаций концентрации индия, возникающей при росте эпитаксиальных пленок (входной контроль) и может входить в основу методики ранней диагностики стадии развития деградационных явлений.

5. Разработана методика визуализации планарной неоднородности концентрации индия в активной области СИД и оптического контроля динамики накопления дефектов в процессе испытаний СИД (изменение цветового состава и площади, сплошной составляющей ЭЛ СИД обусловлено процессами дефектообразования).

3 ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИД

Вольтамперные характеристики являются одним из самых информативных инструментов для изучения механизмов деградации светодиодных гетероструктур [1]. Электрически активные дефекты влияют на прохождение тока через гетероструктуру, на процессы генерации и рекомбинации, туннелирование и диффузии носителей заряда. Как показано в работах [14, 17–19] степень отклонения от идеальности на разных участках ВАХ и их зависимость от режимов и времени испытаний несет важную информацию о разных механизмах зарядопереноса в каждом конкретном случае.

3.1 Прямые ветви вольтамперной характеристики

Исследовались светодиоды SL-V-B24AD малой и SL-V-B45AK повышенной мощности на основе гетероструктуры AlGaIn/InGaIn/GaN с МКЯ фирмы SemiLEDs, изготовленные по технологии «Lift-Off», а также СИД на основе GaN с пятью квантовыми ямами, изготовленные по технологии «Flip-Chip». Все образцы СИД были представлены АО НИИ ПП г. Томск в корпусе без люминофора.

Исследование деградации структуры СИД производилось в режиме ускоренного испытания при повышенных плотностях рабочего тока [85] а также при токах, не превышающих номинальные значения [89].

На рисунке 3.1 показаны начальные участки прямых ВАХ для СИД SL-V-B24AD в зависимости от времени испытаний при номинальном значении рабочего тока.

Как видно из рисунка 3.1, после первого испытания токи стали меньше, чем были до испытания, что обусловлено, по-видимому, накоплением отрицательного заряда в гетероструктуре, ограничивающего поступление основных носителей [14].

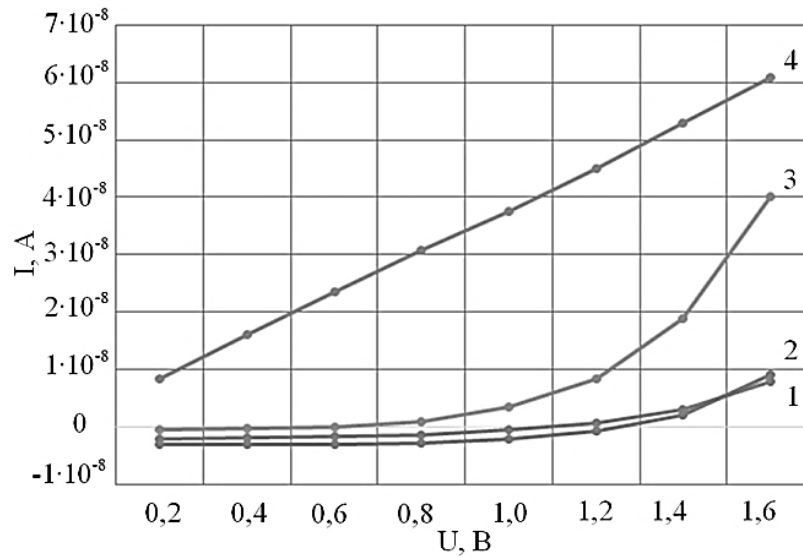


Рисунок 3.1 – Начальные участки прямых ВАХ:
1 – 0 ч; 2 – 160 ч; 3 – 800 ч; 4 – 1120 ч

После второго испытания длительностью 800 часов произошло более существенное изменение прямой ВАХ. Значения токов во всем диапазоне измерений увеличились по сравнению с предыдущими показаниями: особенно это видно, начиная с напряжения на гетероструктуре равного одному вольту (экспоненциальная часть).

Далее, после 1120 часов испытаний, (рисунок 3.1, кривая 4) ВАХ перешла из экспоненциальной в линейную. Это можно объяснить, как и в работе [14], появлением в активной области токопроводящих мостиков с омической проводимостью, проходящих через гетероструктуру. Кроме того, из рисунка видно, что кривая 3, существенно отличается от кривых 1 и 2. Если этот результат связать с формированием токопроводящих мостиков, то можно сказать, что такая характеристика может получиться при таком «мостике», который еще не полностью «проколол» гетероструктуру.

Чтобы сказать более конкретно об изменениях экспоненциальной части прямой ВАХ нужно построить эти зависимости в логарифмическом масштабе, что представлено на рисунке 3.2.

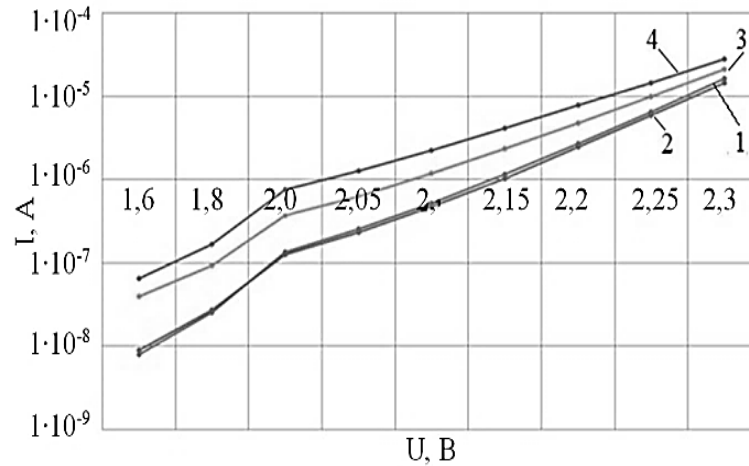


Рисунок 3.2 – Прямые вольтамперные характеристики (начальные участки) в логарифмическом масштабе до и после испытаний:

1 – 0 ч; 2 – 160 ч; 3 – 800 ч; 4 – 1120 ч

Как видно из рисунка 3.2 часть ВАХ, соответствующая туннельно-рекомбинационным процессам (см. главу 2), начинается примерно с двух вольт и от испытания к испытанию становится более пологой. Как показано в главе 2, туннельно-рекомбинационная составляющая ЭЛ в СИД на основе GaN начинается как раз с этого напряжения. До напряжения в два вольта p - n -переход практически закрыт. Уменьшение крутизны экспоненты от испытания к испытанию можно объяснить тем, что величина показателя экспоненты уменьшается. Поскольку измерения ВАХ проводятся в области действия туннельных механизмов, то уменьшение показателя экспоненты можно связать с улучшением условий туннелирования основных носителей через гетероструктуру. 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 [17].

Если продолжить зависимости 1, 2, 3 в область больших напряжений, то они пересекутся при напряжении 2,5 В, когда начинается резко увеличиваться инжекционная электролюминесценция, что согласуется с литературными данными [15].

На рисунке 3.3 представлены ВАХ одного из образцов СИД, изготовленных по Flip-Chip технологии до и после непрерывного испытания в течение трех месяцев.

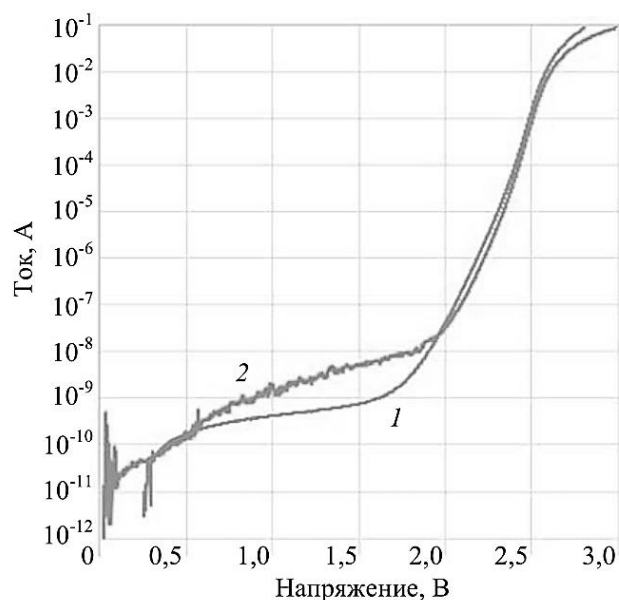


Рисунок 3.3 – Прямые вольтамперные характеристики в логарифмическом масштабе: 1 – до испытаний; 2 – после испытаний

ВАХ построены в диапазоне напряжений от 0 до 3В в полулогарифмическом масштабе, поэтому значения тока отрицательной величины, наблюдаемые при малых напряжениях до испытаний, не отображены (см. рисунок 3.3, кривая 1). Отрицательные токи при малых напряжениях обусловлены, по-видимому, действием встроенных внутрикристаллических полей [13].

Если рассмотреть ВАХ СИД, измеренную до испытаний, то по ее виду можно сказать, что она обусловлена влиянием паразитных параллельных и последовательных сопротивлений в гетероструктуре [1, 4]. В данной ВАХ (рисунок 3.3, кривая 1) в диапазоне напряжений от 0,5 до 1,5 В наблюдается участок с небольшим наклоном в полулогарифмическом масштабе. Причем величина тока на этом участке должна примерно совпадать по величине с обратным током насыщения [1, 4]. Ток на этом участке объясняется утечками,

обусловленными внутренними дефектами, имеющимися еще до испытаний. Наибольшие изменения после испытаний наблюдаются на начальном участке ВАХ в диапазоне напряжений от нуля до примерно 2,0 В. Кроме того, участок с отрицательными токами (кривая 2), обусловленный внутрикристаллическими полями, практически исчез.

Сравнивая ВАХ СИД после долговременных испытаний с первоначальной, 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 [3, 14, 15, 31].

Следует отметить, что после длительных испытаний появились изменения и на участках ВАХ при больших напряжениях, что свидетельствует об изменении не только паразитного параллельного, но и паразитного последовательного сопротивления, которое и ограничивает ток через гетероструктуру.

Вернемся к описанию изменений начальных участков ВАХ СИД. Как видно из рис. 3.3 (кривая 2), на начальном участке ВАХ в диапазоне напряжений от 0 до 2 В появилась нестабильность тока. Поскольку начальные участки ВАХ в полулогарифмическом масштабе не выявляются полностью, рассмотрим ВАХ в обычном (линейном) масштабе, как изображено на рисунке 3.4.

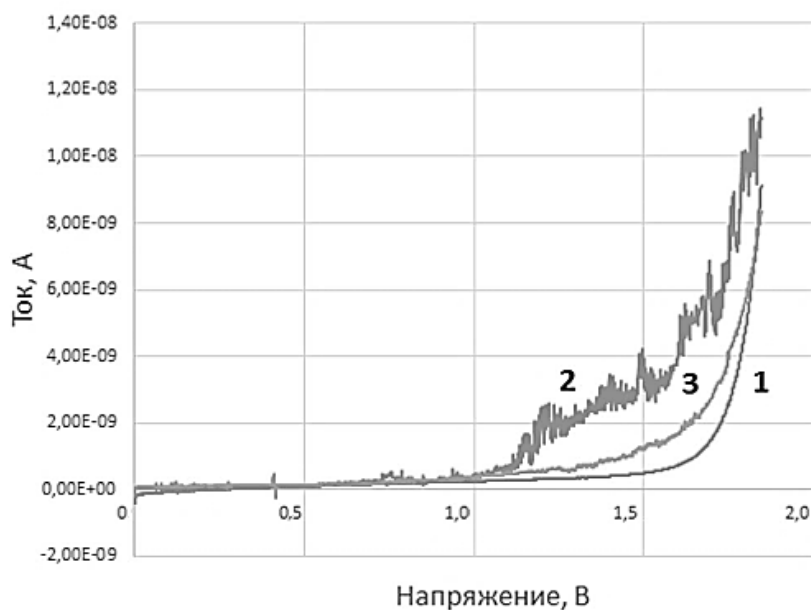


Рисунок 3.4 – Начальные участки ВАХ СИД до испытаний (1), после испытаний (2) и спустя месяц отдыха после испытаний (3)

Из рисунка 3.4 видно, что ВАХ до испытаний (кривая 1) имеет гладкий (без нестабильностей) вид. Небольшая в линейном масштабе нестабильность наблюдается только в диапазоне существования отрицательных токов. Нарастание тока (кривая 1) плавное и наблюдается, начиная с напряжения примерно 1,75 В (напряжение включения).

После продолжительных испытаний начальный участок ВАХ существенно изменяется: уменьшается напряжение при котором начинается увеличение тока (преждевременное включение) и появляется нестабильность (скачки) тока (см. рисунок 3.4, кривая 2).

После отдыха образца в течение месяца ВАХ частично релаксирует, возвращаясь к первоначальному положению: увеличивается напряжение включения и существенно уменьшается амплитуда нестабильности (см. рисунок 3.4, кривая 3).

3.2 Обратные ветви вольтамперной характеристики

Изменения на прямой и обратной ветви ВАХ в диапазоне (10^{-9} – 10^{-6}) А являются чувствительным инструментом, выявляющим динамику деграционных явлений в СИД, связанных с накоплением дефектов в гетероструктуре.

Ниже представлены результаты экспериментальных измерений обратных ветвей ВАХ СИД при токе в диапазоне (10^{-9} – 10^{-6}) А после испытаний и релаксации [89]. На рисунке 3.5 представлены графики, позволяющие увидеть динамику деградации СИД в зависимости от времени и режимов испытаний.

Как видно из рисунка 3.5, обратные ветви ВАХ после испытаний сдвигаются в область меньших напряжений, однако после релаксации порядка 1 суток ВАХ «восстанавливается», но не полностью. Как и в работе [16], было замечено, что обратные токи СИД на начальной стадии деградации растут с увеличением напряжения относительно медленно, однако затем резко ускоряются вплоть до выхода образца из строя.

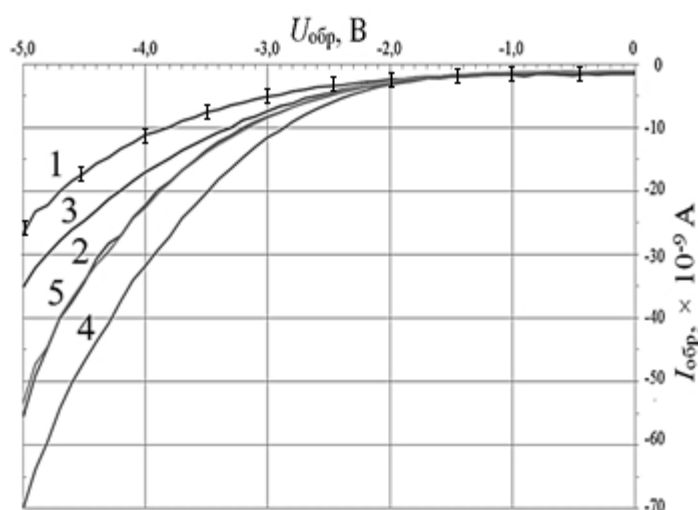


Рисунок 3.5 – Изменение обратных ВАХ СИД SL-V-B24AD после испытаний (2,4) и после релаксации (3,5) [89]

Поскольку производитель обычно указывает на предельно допустимое обратное напряжение, равное минус 5 В, измерения обратной ВАХ производилось в диапазоне 0...–5 В и –5...0 В. На рисунке 3.6 представлены обратные ВАХ flip-chip светодиода.

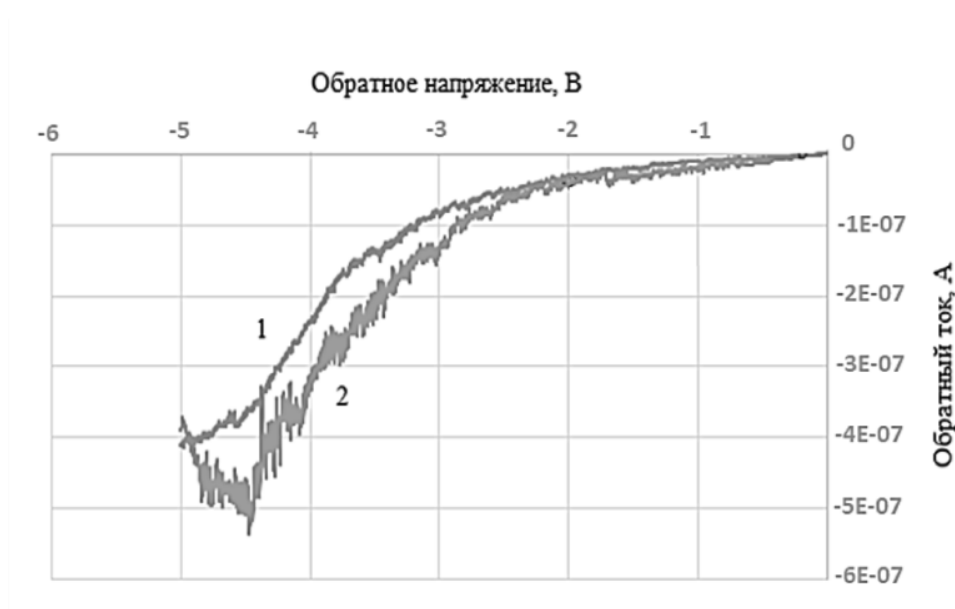


Рисунок 3.6 – Обратные ВАХ СИД, изготовленного по flip-chip технологии:

- 1 – измеренная от 0 вольт до минус 5 В (прямой ход);
- 2 – измеренная от минус 5 В до 0 В (обратный ход)

Как видно из рисунка 3.6, ВАХ (прямой и обратный ход) образуют петлю гистерезиса, причем при обратном ходе ВАХ наблюдаются существенные нестабильности тока. Такое поведение ВАХ, очевидно, обусловлено процессами ударной ионизации, т.к. напряжения, прикладываемые к СИД значительно превышают величину (ΔE), где $\Delta E = 3,42$ эВ – ширина запрещенной зоны GaN.

Поскольку в данном диапазоне отрицательных напряжений в СИД протекают процессы ударной ионизации, возникает вопрос влияет ли измерение обратной ветви на результаты прямой ветви ВАХ.

Вначале полные ВАХ (прямые и обратные) проводились в диапазоне напряжений –5...+3 В. На рисунке 3.7 приведены прямые и обратные ветви ВАХ в полулогарифмическом масштабе для СИД, изготовленного по flip-chip

технологии в диапазоне напряжений $-5...+3$ В для трех следующих друг за другом (без перерыва) измерений.

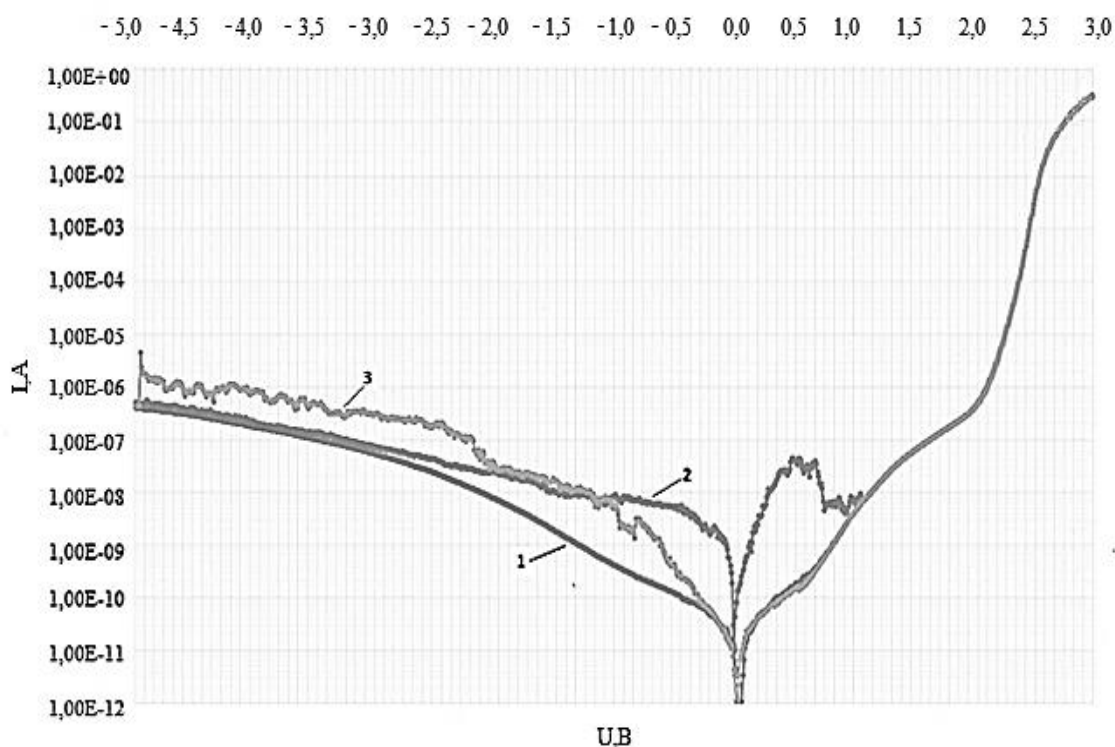


Рисунок 3.7 – Прямые и обратные ветви ВАХ в полулогарифмическом масштабе: 1 – первое измерение; 2 – второе измерение; 3 – третье измерение

Как видно из рисунка 3.7, процессы ударной ионизации сказываются не только на обратных ветвях ВАХ, но и изменяют прямые ветви ВАХ. Поэтому было предложено провести такие же измерения, но в диапазоне $-3...+3$ В, чтобы исключить влияние ударной ионизации.

На рисунке 3.8 приведены прямые и обратные ВАХ в полулогарифмическом масштабе для СИД в диапазоне напряжений $-3...+3$ В, измеренные сразу после измерения ВАХ в диапазоне $-5...+3$ В.

Как видно из рисунка 3.8, первое измерение, проведенное сразу после измерений ВАХ в диапазоне $-5...+3$ В, показало, что влияние процесса ударной ионизации сказывается довольно долго. Кроме того, после проведения испытаний, заметные процессы ударной ионизации возникают при меньших напряжениях.

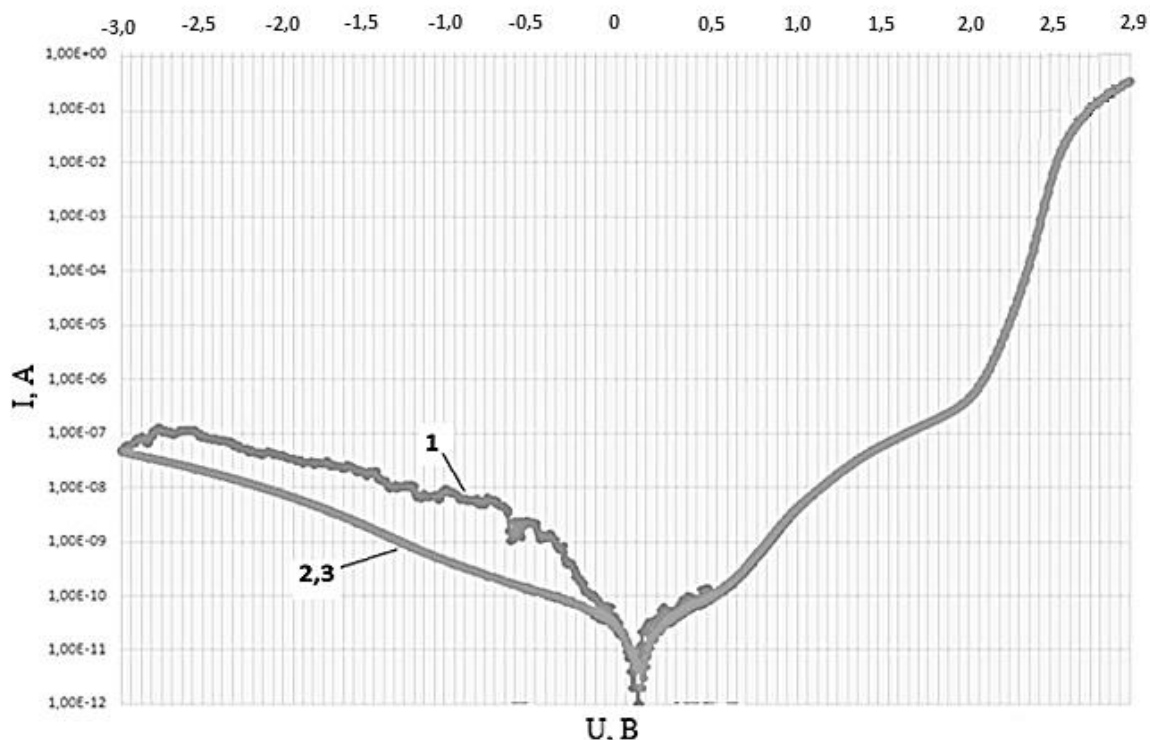


Рисунок 3.8 – ВАХ (прямые и обратные) в полулогарифмическом масштабе для СИД в диапазоне напряжений $-3 \dots +3$ В: 1 – после измерений в диапазоне $-5 \dots +3$ В; 2 – после перерыва в 30 мин; 3 – после перерыва 15 мин

Как видно из рис. 3.9 на обратной ВАХ (1), измеренной сразу после испытаний при приближении к напряжению минус 3 вольта возникают макронеустойчивости, свидетельствующие о возникновении процессов ударной ионизации, хотя приложенное напряжение еще не достигло 3,4 В. Измерение обратной ВАХ в другом направлении (от минус 3 В до нуля) подтверждает данное предположение, т. к. возникает гистерезис и характерное возрастание тока, сопровождающееся всплесками тока, свидетельствующими о возникновении локальных положительных объемных зарядов вследствие прохождения электронных лавин (микроплазм).

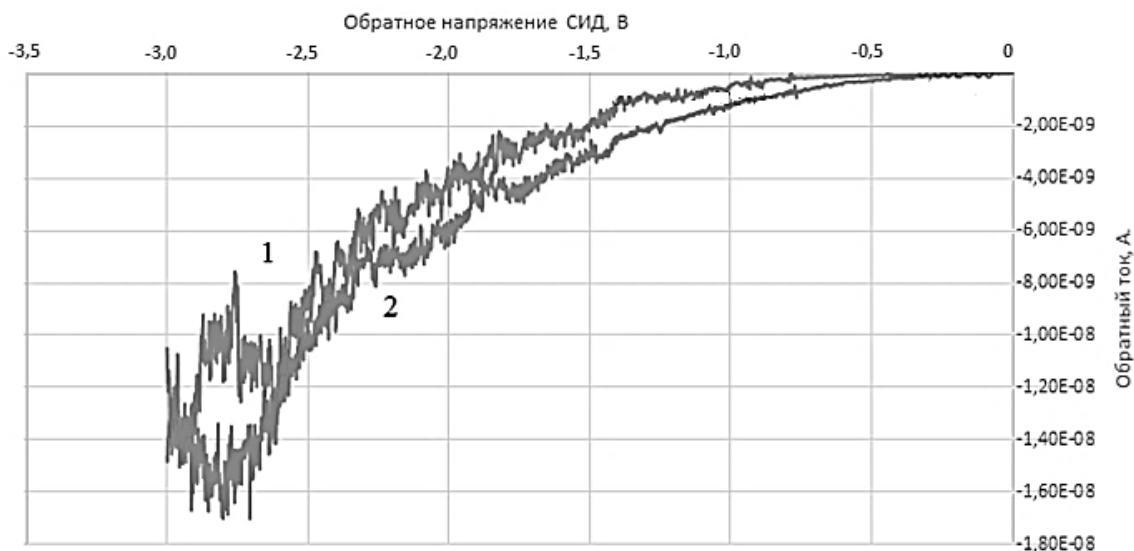


Рисунок 3.9 – Обратные ВАХ СИД в диапазоне напряжений $-3...+3$ В после испытаний

Таким образом, нестабильности обратной ветви ВАХ в области напряжений от нуля до минус 5 В обусловлены не только влиянием встроенных кристаллических полей, неоднородностей структуры и прыжковым механизмом проводимости, но и процессами ударной ионизации, которые могут создавать дополнительные дефекты. Поэтому при испытаниях и измерениях ВАХ не следует превышать напряжение минус 3 В, хотя производителями СИД введено ограничение до минус 5 В.

Как показали результаты экспериментов, количество точечных дефектов (центров захвата носителей заряда) увеличивается, вследствие этого увеличивается вероятность туннельных переходов (рост обратной ветви ВАХ смещается в сторону меньших напряжений), которая, по-видимому, обусловлена прыжковым механизмом туннелирования носителей заряда [14].

Таким образом, туннельно-рекомбинационные токи являются основной составляющей обратного и прямого тока при малых смещениях. В туннельных процессах, носители, туннелировавшие на глубокие уровни в p -GaN, вызывают безызлучательную рекомбинацию, а дырки, туннелирующие через промежуточные состояния в активную область с последующей излучательной и безызлучательной рекомбинацией. Когда светодиоды находятся под напряжением

при непрерывном токе большой величины, в активной области формируются каналы предпочтительного зарядопереноса. Вероятность туннелирования носителей становится выше, что приводит к тому, что на начальных участках ВАХ возникают токи большей величины при обратном и малом прямом смещении.

Неоднородность состава индия играет очень важную роль в процессах люминесценции многоямных светодиодов InGaN/GaN. Неоднородность индия обеспечивает локализованные состояния [90]. Как указывали многие исследователи, процессы деградации светодиодов сопровождаются медленной генерацией дефектов [15]. С увеличением времени испытаний, все больше и больше носителей оседают на дефектах тем самым, не участвуя в излучательной рекомбинации. В многоямных светодиодах InGaN/GaN, подверженных низкому уровню прямого смещения, эффект локализованных состояний, вызванный неоднородностью состава индия, препятствует процессам, протекающим в квантовых ямах. Следовательно, увеличение концентрации индия в синих многоямных светодиодах InGaN/GaN может положительно сказаться на сроке службы [16].

После многочасового отдыха СИД (нахождения в выключенном состоянии при комнатной температуре) наблюдается некоторый эффект восстановления: уменьшается ток утечки, уменьшается влияние электрических диполей, увеличивается напряжение участка роста обратной ВАХ.

3.3 Исследования нестабильности электрических характеристик flip-chip светодиодов в зависимости от времени испытания и релаксации

После проведенных испытаний [91] в одном из образцов, изготовленных по flip-chip технологии, были обнаружены нестабильности ВАХ в области микротоков. В других образцах явных изменений в полученной ВАХ не выявлено.

На рисунке 3.10 изображены прямые вольтамперные характеристики нестабильного образца на первых стадиях испытаний.

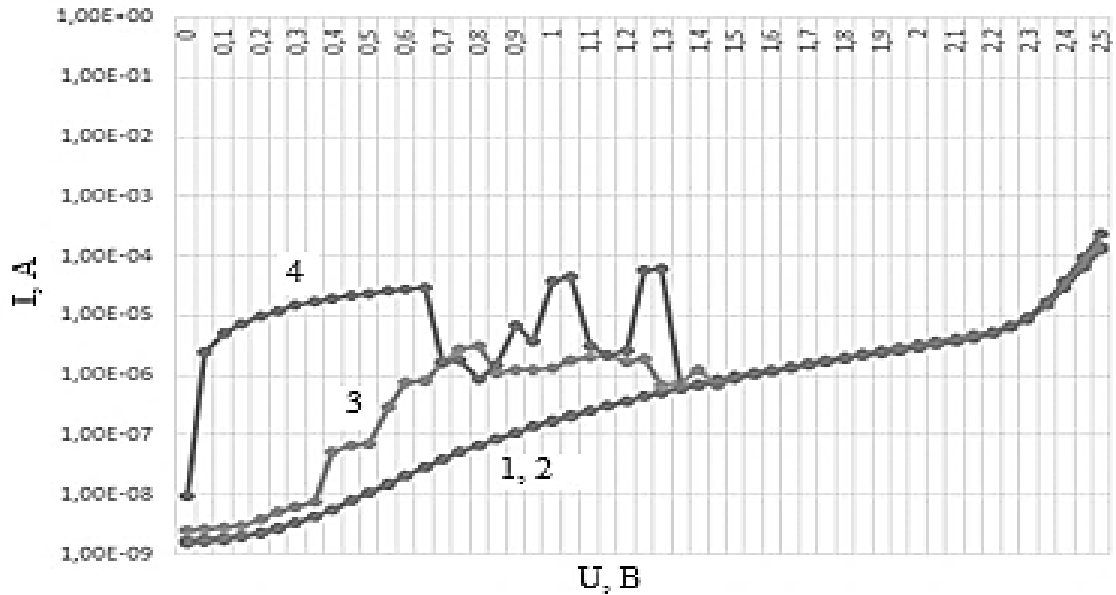


Рисунок 3.10 – Прямые ВАХ в полулогарифмическом масштабе нестабильного образца на первых стадиях испытаний:

- 1 – до испытаний; 2 – после часа испытаний; 3 – после 20 часов испытаний;
4 – после ещё одного часа испытаний.

Как видно из рисунка 3.10, после одного часа испытаний при номинальном токе 350 мА ВАХ практически не изменилась. Однако после двадцати часов испытаний картина ВАХ существенно меняется: в области малых напряжений (0,3–1,4) В в процессе измерения ВАХ возникли нестабильности тока.

Можно заметить, что после еще одного дополнительного часа испытаний величина тока в указанной области напряжений увеличивается, а начальное напряжение, при котором возникают нестабильности, уменьшается. Подобные нестабильности тока в светодиодной гетероструктуре были отмечены в работе [14].

Как показано в работе [14], подобные нестабильности могли частично «залечиваться». Поэтому было принято решение выдержать образец некоторое время без нагрузки, после чего были проведены повторные измерения ВАХ.

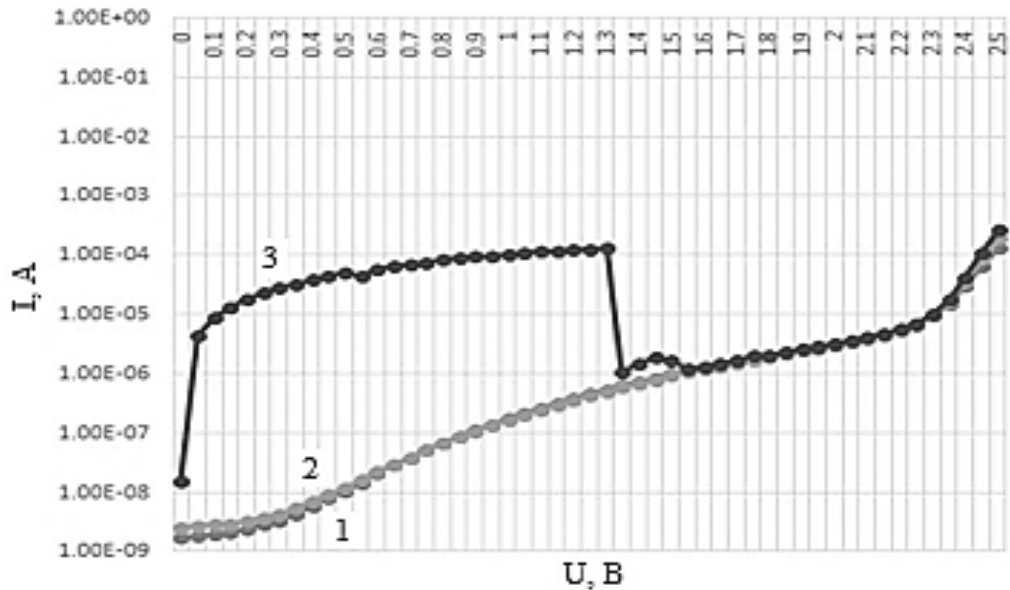


Рисунок 3.11 – Прямые ВАХ в полулогарифмическом масштабе нестабильного образца после релаксации и после дополнительного испытания: 1 – до испытаний; 2 – повторные измерения после релаксации в течение суток; 3 – после дополнительных испытаний в течение часа

Как видно из рисунка 3.11, после трехдневной релаксации произошло исчезновение нестабильностей тока, и общая ВАХ практически стала совпадать с характеристикой «свежего» образца (до испытаний). Однако проведение испытаний в течение одного часа при несколько меньшем токе (300 мА) вновь привело к появлению нестабильности тока.

Это свидетельствует о том, что процесс деградации даже при меньшем токе полностью ликвидировал положительный эффект, вызванный релаксацией, и не только повторил деградационную картину, возникшую после первого испытания, но и несколько ухудшил ее (ток утечки при малых напряжениях возрос в несколько раз).

Как и в работе [14] подобные явления можно объяснить следующим образом. В процессе релаксации может происходить обратная диффузия примесей и атомов металла из дефектных трубок гетероструктуры, что приводит к уменьшению длины и электропроводностей таких трубок. Чем больше время релаксации, тем сильнее этот эффект. Этот процесс приводит к уменьшению токов утечки в гетероструктуре и исчезновению нестабильностей.

Наблюдавшиеся омические закоротки также могли частично «самозалечиваться» изменением полярности приложенного напряжения и вновь создаваться под прямым смещением, как показано в работе [14].

В связи с этим были проведены следующие эксперименты. После долговременных испытаний образец был поставлен на испытание при обратном напряжении. При этом напряжение, как указывает производитель, не должно превышать 5 В, чтобы не возникли дополнительные дефекты.

На рисунке 3.12 изображены прямые ВАХ нестабильного образца после одного часа испытаний при обратном его подключении.

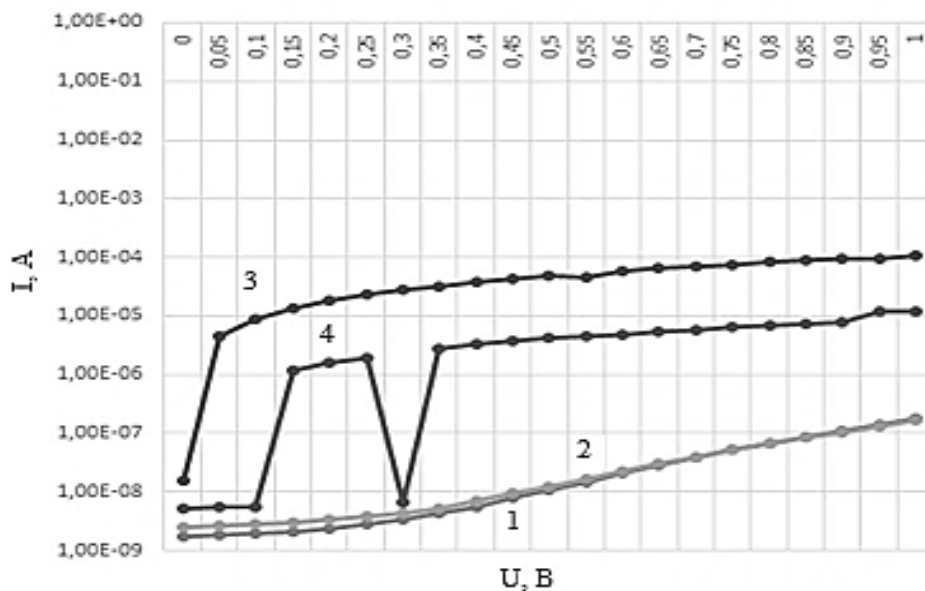


Рисунок 3.12 – Прямые ВАХ в полулогарифмическом масштабе нестабильного образца до и после испытаний: 1 – до испытаний; 2 – после испытаний 22 часа с последующей релаксацией в течение суток; 3 – после дополнительных испытаний в течение часа; 4 – после кратковременной выдержки образца при напряжении обратной полярности

Как показали экспериментальные результаты, после выдержки нестабильного образца при обратном напряжении на начальных участках его прямой ВАХ видно уменьшение тока утечки и увеличение порогового напряжения, что свидетельствует о процессах «самозалечивания». Сравнивая скорость самозалечивания при длительной релаксации и кратковременном

включении СД при обратном напряжении, можно сделать вывод, что при обратном напряжении гораздо быстрее происходит восстановление свойств структуры образца, чем при релаксации в выключенном состоянии.

Как показано в [13, 14], все процессы деградации происходят в неких дефектных трубках, в которых происходит сильный локальный нагрев, механические напряжения и образование дополнительных точечных дефектов, являющихся центрами безызлучательной рекомбинации, которые, нагреваясь, способствует дальнейшему образованию дефектов. В работах [87, 92, 93] было показано, что в качестве таких трубок могут выступать скопления линейных дислокаций, пронизывающих активную зону СД.

3.4 Исследование процессов релаксации вольтамперной характеристики после испытаний

В качестве объекта исследования использовались «стабильные» (см. подразд. 3.3) синие AlGaIn/InGaIn/GaN светодиоды средней мощности в корпусе без люминофора, выполненные по технологии Flip-Chip, установленные на теплоотводе, изготовленном по алюмооксидной технологии.

На рисунке 3.13 изображены прямые и обратные ветви ВАХ в полулогарифмическом масштабе до и после испытаний и релаксации [94].

Как видно из рисунка, после двух суток испытаний (кривая 2) при токе 350 мА картина ВАХ существенно меняется: в области отрицательных напряжений наблюдается изменение положения «острия» в левую сторону. В области положительных напряжений картина меняется незначительно.

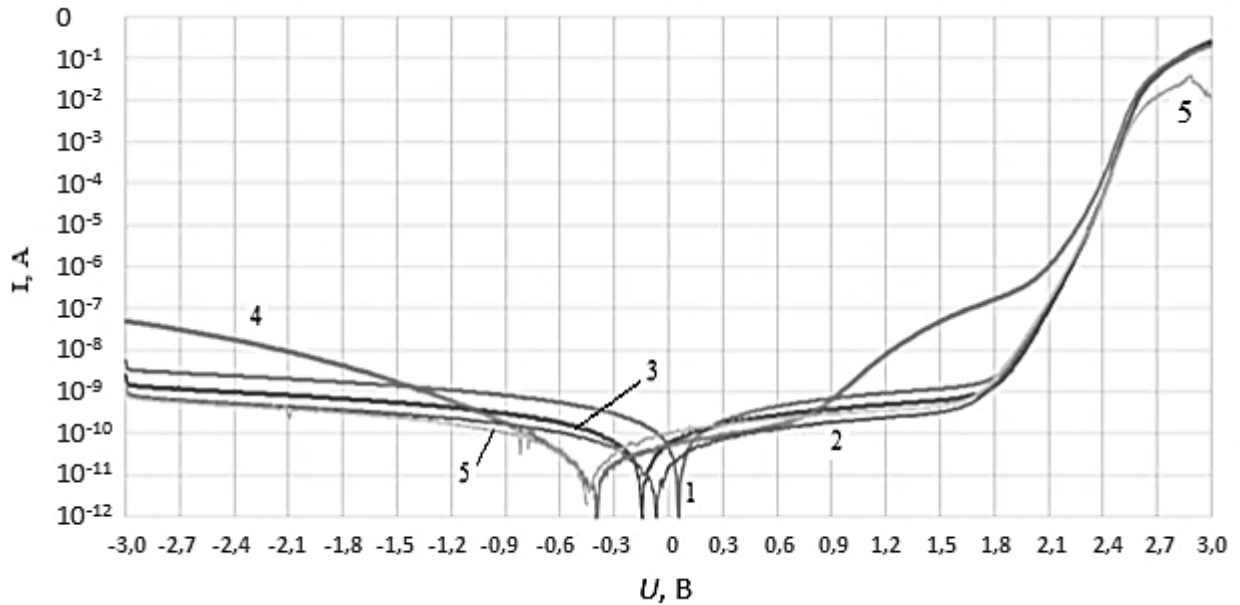


Рисунок 3.13 – Прямые и обратные ветви ВАХ в логарифмическом масштабе до и после испытаний: 1 – до испытаний; 2 – после 48 ч испытаний; 3 – после 48 ч отдыха; 4 – после 168 ч отдыха; 5 – после 408 ч отдыха

Следующим этапом исследований являлась длительная релаксация (5 суток отдыха). На рисунке 3.13 приведена вольтамперная характеристика этого же образца (кривая 4) после релаксации. Как видно из рисунка (кривая 4), изменение ВАХ произошло во всем диапазоне напряжений, особенно сильные изменения произошли при прямом напряжении в диапазоне от 1,0 до 2,3 В: появилась «выпуклость», которая ранее не наблюдалась. При последующем измерении ВАХ все особенности «исчезли».

Через 17 суток релаксации было проведено измерение ВАХ (кривая 5). Отличительной особенностью ВАХ (кривая 5) явилось существенное уменьшение тока при больших напряжениях: по сравнению с последним измерением (ток уменьшился с 200 до 40 мА). После этого измерения ВАХ были повторены несколько раз подряд. После второго измерения значение тока при напряжении 3 В упало до критически малых значений (до нескольких миллиампер). После третьего измерения значение тока стало «колебаться»: при 2,9 В ток возрос до 60 мА, а в области 3,0 вновь упал до нескольких миллиампер. Таким образом, после испытаний и длительной релаксации даже в «стабильных» СИД стали

наблюдаться в процессе измерений ВАХ всплески макротоков и мигание света СИД. Во время четвертого измерения ВАХ восстановилась – стала совпадать с предыдущим измерениями, проведенными до релаксации.

Вышеизложенные изменения ВАХ можно объяснить, учитывая данные работы [14], следующим образом. В процессе релаксации (нахождения в выключенном состоянии при комнатной температуре) происходит рассасывание и перераспределение локализованных на границах КЯ в процессе испытаний носителей заряда (захват их на более глубокие ловушки). После многочасового отдыха СИД наблюдается некоторый эффект восстановления: уменьшается ток утечки, увеличивается напряжение участка роста обратной ВАХ. Но с другой стороны ранее захваченные на мелкие ловушки носители заряда диффундируют в глубь буферных слоев, в результате чего паразитное последовательное сопротивление гетероструктуры увеличивается, что и влияет на величину максимального тока на конечном участке ВАХ. Нестабильности макротока возникают при существенном изменении плотности объемного заряда на границе квантовых ям и буферных слоев. При этом этот заряд играет роль затвора как в полевом транзисторе [14], что усиливает амплитуду колебаний тока.

Таким образом, анализ ВАХ, полученных до и после испытаний, и после релаксации показывает, как протекает процесс деградации СИД. С увеличением времени испытаний и нагрузочных токов возрастают индуцированным электрическим стрессом токи утечки. Рост сквозного тока утечки может быть связан с формированием электрического поля в области гетерограниц СИД. При этом, потенциал возникшего в процессе испытаний диполя компенсирует встроенное напряжение гетероструктуры, этим и обусловлено движение «пиков» ВАХ в области нано-ампер.

При дальнейших испытаниях локальные потенциальные барьеры в квантовых ямах изменяются еще больше, что приводит к нестабильности тока каналов утечки. Такой процесс может быть связан с перезарядкой граничных состояний, играющих роль «затвора» канала (как в полевом транзисторе).

При более длительных испытаниях включаются ионные механизмы (электромиграция заряженных примесей и дефектов), что приводит к увеличению диаметров каналов утечки и разрастанию пятен затемнения туннельно-рекомбинационного излучения (см. главу 2) от испытания к испытанию, появлению дополнительных токов утечки и нестабильности, а также к возникновению эффекта релаксации после испытаний.

В результате в данной главе 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.

Таким образом, доказано третье защищаемое научное положение: «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».

Полученные результаты представляют основу метода входного контроля в производстве светодиодных изделий, который позволит характеризовать состояние не только «свежих» образцов, но и следить за процессами деградации структуры СД при испытаниях и эксплуатации.

Выводы по главе

1. Изменения начальных участках прямой и обратной ветви ВАХ в диапазоне токов (10^{-9} – 10^{-6}) А коррелирует с изменениями туннельно-рекомбинационного свечения и являются чувствительным инструментом, выявляющим динамику деградационных явлений в СИД, связанных с накоплением дефектов в гетероструктуре.

2. Многочасовой отдых СИД после испытаний (нахождение в выключенном состоянии при комнатной температуре) приводит к некоторому эффекту «восстановления»: уменьшению тока утечки, уменьшению влияния электрических диполей, увеличению напряжения участка роста обратной ВАХ.

3. Используя предлагаемый метод контроля за динамикой накопления дефектов в СИД в процессе испытаний при разных режимах электрической нагрузки, можно выделить режим, при котором интенсивность деградационных явлений (изменения роста обратной ВАХ в области микротоков) будет

соответствовать заявленному производителем сроку службы в различных условиях эксплуатации СИД.

4. Использование прецизионной измерительной техники позволяет выявить изменения в ВАХ в зависимости от режимов и времени испытаний на более ранней стадии, что может служить основой для создания более чувствительных методик ранней диагностики деградационных явлений, а также позволяет более точно определять влияние встроенных кристаллических полей на процессы деградации. Изменение сквозного тока утечки обусловлено формированием электрического диполя в области гетерограниц, которое связано с испытаниями при больших токовых нагрузках, а также с влиянием встроенного напряжения, обусловленного макроскопическими поляризациями.

5. Полученные результаты позволяют выявить закономерности изменения параметров СИД в процессе испытаний для дальнейшего выбора оптимального щадящего режима работы СИД, а также эти результаты могут служить основой для входного контроля параметров СИД, диагностики начала интенсивных процессов деградации, обоснованного выбора оптимального режима СИД, и повышения качества и срока жизни конечного продукта на производстве.

4 ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫЕ И ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КРИСТАЛЛАХ СИД В УСЛОВИЯХ НЕОДНОРОДНОЙ ИНЖЕКЦИИ

Известно [95], что деградация светоизлучающего диода (СИД) при высокой плотности тока превосходит значения, наблюдаемые при низкой плотности тока даже при повышенной температуре окружающей среды.

Это свидетельствует о том, что причиной деградации являются процессы, протекающие в гетероструктуре при больших плотностях тока. При эксплуатации СИД под действием тока большой плотности происходит электродиффузионное перераспределение примесей в области скопления протяженных микродефектов (в особенности дислокаций), понизывающих активную область СИД [14] и подпороговая генерация точечных дефектов в квантовых ямах [30]. Это приводит к локальным изменениям, в частности, к сильному локальному нагреву [13, 96], механическим напряжениям и образованию дополнительных точечных дефектов, являющихся центрами безызлучательной рекомбинации, которые, нагреваясь, способствуют дальнейшему образованию дефектов [28].

В данном разделе приведены аналитические оценки температуры локального перегрева, как в области отдельных протяженных дефектов, так и их скоплений [87].

4.1 Расчет температуры перегрева в области протяженного дефекта

Пусть ток равномерно распределен по площади СИД без учета эффекта растекания тока. Допустим, что внутренний квантовый выход близок к 100%, а выделение тепла происходит только в области протяженного дефекта, где наблюдаются безызлучательные переходы и энергия электрического поля полностью превращается в тепловую (рисунок 4.1).

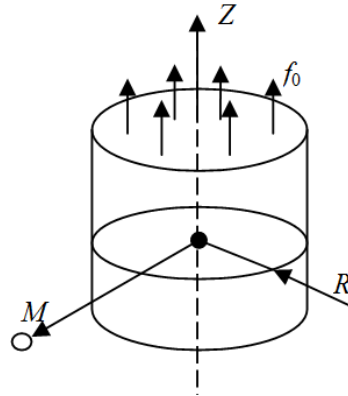


Рисунок 4.1 – Источник тепла, равномерно распределенный в цилиндрическом шнуре

Рассмотрим одиночный протяженный дефект в виде цилиндрического шнура радиуса R (см. рисунок 4.1). Сделаем также и другие допущения. 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

$$f(r) = \begin{cases} f_0, & r < R \\ 0, & r > R \end{cases}, \quad (4.1)$$

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 [97]:

$$\frac{\partial T(M, t)}{\partial t} = a \Delta T(M, t) + f(M, t), \quad (4.2)$$

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

Начальное и граничное (асимптотическое) условия в цилиндрической системе координат имеют вид:

$$\begin{cases} T(r, 0) = 0 \\ T(\infty, t) = 0 \end{cases}. \quad (4.3)$$

В соответствии с условием (4.3) величина $T(M, t)$ есть разница между температурой в данной точке M в момент времени t и температурой среды до начала действия источников тепла. Для краткости будем называть величину T температурой.

Для любого момента времени температура максимальна в центре шнура, поэтому целесообразно рассмотреть изменение температуры при $r=0$. Как показано в Приложении А и в [98], изменение температуры в центре шнура описывается следующим выражением:

$$\delta T(0, t) = f_0 \left(t - \int_0^t e^{-\frac{R^2}{4a\tau}} d\tau \right); \quad (4.4)$$

$$T(0, t) = f_0 t \left[1 - E_2 \left(\frac{R^2}{4at} \right) \right]. \quad (4.5)$$

Величину функции мощности можно определить следующим образом:

$$f_0 = \frac{U \cdot I}{\pi R^2 L \cdot C \cdot \rho} = \frac{E \cdot I}{\pi R^2 C \cdot \rho}, \quad (4.6)$$

где U – электрическое напряжение, приложенное к активной зоне; I – величина тока; E – напряженность электрического поля.

Оценим аргумент интегральной экспоненты E_2 . Для нитрида галлия температуропроводность $a = 4,3 \cdot 10^{-5}$ м²/с [78]. Визуальные наблюдения показывают, что $R < 10^{-7}$ м. Отсюда при относительно небольших t (например, при $t = 10^{-3}$ с) получим:

$$\frac{R^2}{4at} < 10^{-6}. \quad (4.7)$$

Данная оценка позволяет воспользоваться более простой формулой (при разложении экспоненты в ряд) для вычисления перегрева в центре теплового шнура:

$$T(0,t) = \frac{E \cdot I}{4\pi\lambda} \left(1 - \gamma - \ln \frac{R^2}{4at} \right), \quad (4.8)$$

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

Как видно из выражения (4.8), существенное влияние на перегрев оказывают три параметра: напряженность электрического поля E , полный ток через тепловой шнур I и коэффициент теплопроводности среды λ . 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 $J = 150$ А/см² [13]. Таким образом, для радиуса величиной $R = 10^{-7}$ м величина полного тока равна: $I = J \cdot S = J \cdot \pi \cdot R^2 = 150 \cdot 10^4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-14} \approx 0,5 \cdot 10^{-6}$ 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

Расчет производился в среде MathCAD по формуле (4.8) при следующих параметрах СИД на основе GaN: $C = 431$ Дж/(кг·К); $a = 4,3 \cdot 10^{-5}$ м²/с; $\lambda = 130$ Вт/м·К; $\rho = 6,15 \cdot 10^3$ кг/м³; $L = 50 \cdot 10^{-9}$ м; $J = 150$ А/см²; $U = 3$ В; $t = 10^2$ с. Ниже

приведены результаты расчета температуры перегрева в центре теплового шнура от радиуса шнура, при $J = 150 \text{ А/см}^2$ (табл. 4.1).

Таблица 4.1 – Результаты расчета для плотности тока, равной 150 А/см^2

$R, \text{ м}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-6}$
$T, \text{ К}$	0,014	1,426	5,7	12,83	22, 82	35,1	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 4.1, перегрев при радиусах тепловых шнуров, соответствующих размерам выходов одиночных дислокаций ($R \leq 10^{-7} \text{ м}$), 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 А/см^2 (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Результаты расчета для плотности тока, равной 200 А/см^2

$R, \text{ м}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-6}$
$T, \text{ К}$	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 6–10 мкм температура перегрева превышает 100–150 градусов, что соответствует критическому значению, при котором наступает катастрофическое изменение, приводящее к выходу из строя СИД.

Разработанный метод теплового расчета может стать основой для разработки методов неразрушающего контроля качества и обнаружения потенциально ненадежных светодиодов.

4.2 Исследование роли термопластических явлений в деградации InGaN гетероструктуры светодиодов

В работе [14] неоднородность инжекции носителей заряда по площади структуры связывают с локальной диффузией и электромиграцией остаточных примесей вдоль дефектных трубок, индуцированной механическими напряжениями, возникающими при формировании электродов. В данной работе мы проводим оценку роли термопластической явлений в расширении дефектных областей вследствие генерации новых дефектов.

В качестве объекта исследования был выбран светодиод синего свечения с чипом-кристаллом SL-V-B24AD Semileds на основе многоямной гетероструктуры AlGaInN без люминофора с номинальным током эксплуатации 150 мА. Были проведены визуальные исследования поверхности кристалла, в том числе с ультрафиолетовой (УФ) подсветкой. На рисунке 4.2 представлены полученные изображения поверхности кристалла с УФ подсветкой до и после ускоренных испытаний (при повышенных плотностях рабочего тока).

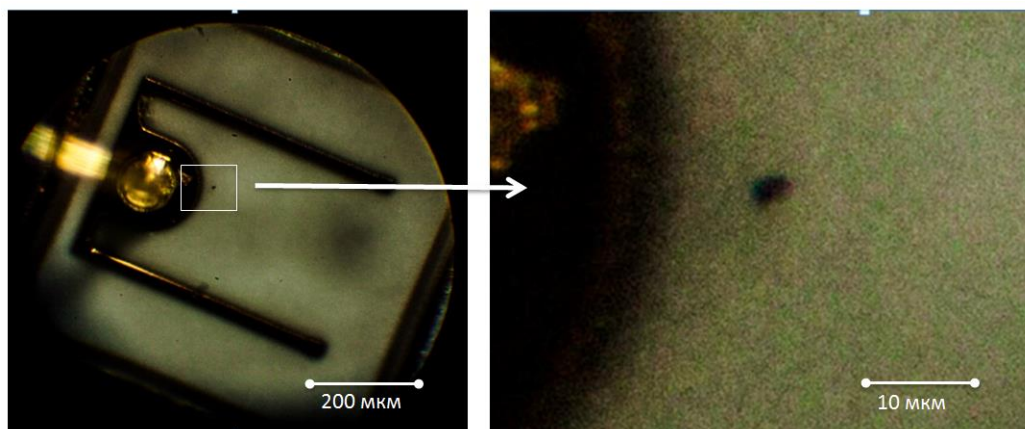
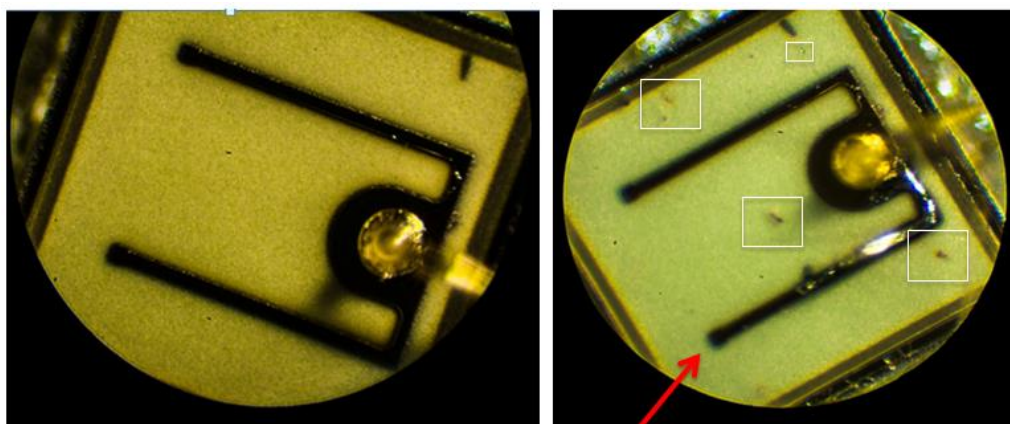


Рисунок 4.2 – Темные пятна на поверхности кристалла

Импульсное УФ-облучение поверхности кристалла получено посредством фотовспышки Canon Speedlight 430 EX II со снятым светофильтром, в конструкции которой имеется ртутная лампа в кварцевом баллоне. Фотографирование поверхности кристалла и картин его фотолюминесценции под действием УФ-облучения производилось с помощью микроскопа МИМ-7 и цифрового фотоаппарата Canon EOS 60D, обладающего большой чувствительностью (100–6400 ISO) и разрешающей способностью (19 МР.). Затем мы постепенно увеличивали ток испытаний от 50 до 100 мА и когда достигли уровня 100 мА, обнаружили первые потемнения на поверхности кристалла (места образования дефектов). Максимальные линейные размеры потемнений вначале составляли порядка 2 мкм. После испытаний при токе 130 мА дефект, который появился при токе 100 мА начал расширяться, а на месте второго потемнения стало видно образование нового точечного дефекта. Также вблизи границы кристалла отчетливо виден новый дефект. Таким образом, можно сказать, что при токе 130 мА уже видна явная картина дефектообразования. Также были определены количество дефектов и их площадь. Кинетика дальнейшего дефектообразования исследовалась при рабочем токе больше номинального.

Таким образом, экспериментальные исследования картин фотолюминесценции поверхности гетероструктуры с УФ подсветкой, показали, что при испытании при повышенных плотностях тока формируются дефектные

области, представляющие собой темные точки и пятна, которые расширяются в процессе деградации, как изображено на рисунке 4.3.



Отслоение электрода

Рисунок 4.3 – Фотография поверхности СИД до и после испытаний

При этом УФ подсветка приводит к возникновению фотолюминесценции дефектных областей в желто-зеленой области спектра и появлению зеленого ореола вокруг темных пятен [30, 73]. На рисунке 4.4 представлены изображения зеленого ореола вокруг дефекта.

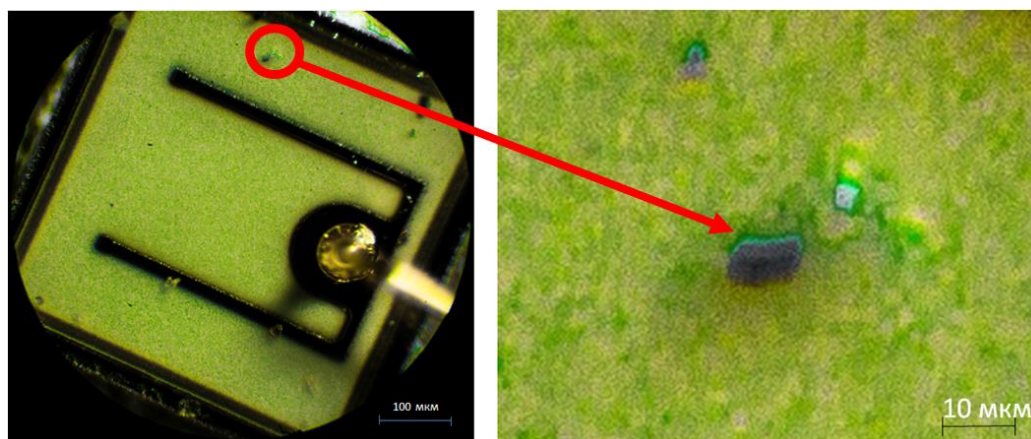


Рисунок 4.4 – Зеленый ореол вокруг дефекта при УФ подсветке

Анализ картин фотолюминесценции показал, что эти темные области представляют собой каналы предпочтительного зарядопереноса, как было описано нами ранее в работе [87]. Безызлучательная рекомбинация и протекание тока по этому каналу приводят к возникновению перегрева, что в свою очередь,

приводит к термическим напряжениям. Наблюдаемый по периметру канала зеленый ореол (при УФ подсветке) свидетельствует о повышенной плотности дислокаций вблизи канала [99].

В таблице 4.3 представлены экспериментальные данные, демонстрирующие зависимость площади дефектов, их количества и максимального диаметров от времени испытания и величины рабочего тока.

Таблица 4.3 – Зависимость количества, диаметра и площади дефектов от величины тока и времени испытаний

N	Величина тока, мА	Время испытания, ч	Количество дефектов	Площадь дефекта, мкм ²	Макс. диаметр, мкм
1	75	6,0	0	0	0
2	100	2,0	2	3,14	2
3	130	3,0	3	120,105	10
4	150	1,5	5	213,52	10
5	170	2,0	12	347,755	10
6	200	0,5	20	909,03	15

Как видно из таблицы 4.3, с увеличением рабочего тока выше номинального уже после 10 часов испытаний наблюдается значительный рост площади дефектов, и при токе 200 мА максимальный радиус некоторых дефектов достигает 7 мкм.

В работе [87], нами было показано, что с увеличением радиуса локального дефекта (шнура) увеличивается температура в центре шнура, и при достижении радиуса 9 мкм перегрев в центре превышает 150 °С, что совпадает с данными [13].

При таком перегреве могут возникать существенные термопластические явления, связанные с расширением вещества в области перегрева [14, 87]. Поэтому мы решили, что в процессе испытаний при неоднородности протекания тока возникают термические напряжения, которые способствуют генерации новых дефектов, что приводит к увеличению размеров дефектных областей.

Далее приведен расчет механических напряжений, возникающих в центре шнура вследствие перегрева, который заключается в оценке величины деформаций вокруг шнура цилиндрической формы.

4.3 Расчет термомеханических напряжений

Для нахождения поля деформаций $u_r(r)$ следует решить уравнение механического равновесия. Воспользуемся готовым решением для изотропного цилиндра [100].

$$u_r(r) = \frac{\alpha}{3} \cdot \frac{1+\sigma}{1-\sigma} \left\{ \frac{1}{r} \int_0^r T(\rho) \cdot \rho \cdot d\rho + (1-2\sigma) \frac{r}{R^2} \int_0^R T(\rho) \cdot \rho \cdot d\rho \right\}, \quad (4.9)$$

где σ – 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; α – температурный коэффициент объемного расширения.

В нашем случае следует сделать предельный переход. Исходя из выражения:

$$\delta T(r, t) = \frac{1}{2a} \int_0^t \int_0^\infty \frac{1}{\tau} \cdot e^{-\frac{\rho^2+r^2}{4a\tau}} \rho \cdot f(\rho) \cdot I_0 \frac{2\rho r}{4a\tau} \cdot d\rho \cdot d\tau \quad (4.10)$$

можно показать (см. Приложение В, выражение ПВ.6), что при $r \rightarrow \infty$,

$$\delta T(r, t) \approx \frac{e^{-r^2/4at}}{r^2} \cdot t.$$

Поскольку t фиксировано, запишем $T \approx \frac{A}{r^2} \cdot e^{-\beta r^2}$.

При данном асимптотическом представлении $T(r)$ интеграл $\int_0^{\infty} T(\rho) \cdot \rho \cdot d\rho$ в (4.9) имеет конечное значение, и, следовательно, второе слагаемое в скобках выражения (4.9) при $R \rightarrow \infty$ обращается в нуль.

Выпишем выражения для тензора деформаций в цилиндрических координатах [100]:

$$\begin{aligned} u_{rr} &= \partial u_r / \partial r; u_{\varphi\varphi} = r^{-1} \partial u_\varphi / \partial \varphi + u_r / r; u_{zz} = \partial u_z / \partial z; \\ 2u_{\varphi z} &= r^{-1} \partial u_z / \partial \varphi + \partial u_\varphi / \partial z; 2u_{rz} = \partial u_r / \partial z + \partial u_z / \partial r; \\ 2u_{r\varphi} &= \partial u_\varphi / \partial r - r^{-1} u_\varphi + r^{-1} \partial u_r / \partial \varphi. \end{aligned} \quad (4.11)$$

Полагая, в соответствии с условиями задачи $d/d\varphi = d/dz = 0$; $u_z + u_\varphi = 0$, получим, что отличны от нуля лишь две компоненты тензора: u_{rr} и $u_{\varphi\varphi}$, причем:

$$u_{rr} = \partial u_r / \partial r; \quad u_{\varphi\varphi} = r^{-1} u_r. \quad (4.12)$$

Подстановка (4.9) в (4.12) дает:

$$\begin{aligned} u_{rr}(r) &= \frac{\alpha}{3} \cdot \frac{1+\sigma}{1-\sigma} \cdot [T(r) - P(r)]; \\ u_{\varphi\varphi}(r) &= \frac{\alpha}{3} \cdot \frac{1+\sigma}{1+\sigma} \cdot P(r), \end{aligned} \quad (4.13)$$

где $P(r) = \frac{1}{r^2} \int_0^r T(\rho) \rho d\rho$.

Далее запишем выражение для тензора механических напряжений [100]:

$$\sigma_{ik} = \frac{E}{1+\sigma} \cdot \left(u_{ik} + \frac{\sigma}{1-2\sigma} \cdot u_{ll} \delta_{ik} \right) - \frac{E\alpha T}{3(1-2\sigma)} \delta_{ik}, \quad (4.14)$$

где u_{ik} – символ Кронеккера; E – модуль Юнга.

Из (4.12) и (4.13) следует:

$$\sigma_{rr}(r,t) = -\frac{\alpha E}{3(1-\sigma)} \cdot P(r);$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = -\frac{\alpha E}{3(1-\sigma)} \cdot (P(r) - T(r)).$$
(4.15)

Установление простой связи между компонентами тензора напряжений и температурой возможно лишь для координаты равной нулю (в центре шнура). Для нахождения величин напряжений, возникающих на оси токового шнура (где они максимальны), разложим интегралы, входящие в (4.8) в ряд в окрестности $r = 0$.

$$\int_0^r T(\rho) \rho d\rho = 0 + 0 \cdot r + \frac{T(0)}{2} r^2 + \dots,$$
(4.16)

откуда $P(0) = T(0)/2$. Таким образом, из (4.15) следует:

$$\sigma_{rr}(0) = \sigma_{\varphi\varphi}(0) = -\frac{\alpha E T(0)}{6(1-\sigma)},$$
(4.17)

где T – превышение температуры в центре шнура.

Подставив в формулу (4.17) справочные значения, получим значения, представленные в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Зависимость механического напряжения в центре шнура от значений температуры перегрева, полученных для различных радиусов шнура (из предыдущего расчета)

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

Таким образом, расчет прочности, проведенный по формуле (4.17) показывает, что напряжение в кристалле нитрида галлия при данных условиях составляет всего около 20 МПа (см. таблицу 4.4), 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 [87], 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 мы вероятно наблюдаем движение (разбегание) дислокаций от области расширения вещества вследствие перегрева за счет термопластических явлений. Как известно [101], силу τ , достаточную для движения дислокаций можно рассчитать по закону Гука:

$$\tau_{\max} = G \cdot x / b, \quad (4.18)$$

где τ – сопротивление решетки сдвигу; G – модуль сдвига; x/b – деформация.

При этом экспериментальные значения τ 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 [101]. А если учитывать, что в гетероструктуре нитрида галлия присутствует большая концентрация начальных дислокаций, которая составляет не менее 10^9 см^{-2} [72], то можно предположить, что такое движение приведет к созданию кластеров с радиусом более 6 мкм. Это может вызывать новые источники перегревов, увеличение концентрации крупных дефектов и их расширение, что и наблюдается в эксперименте.

На рисунке 4.5 представлены фотографии поверхности и свечения, на которых также видно появление темной области после испытаний.

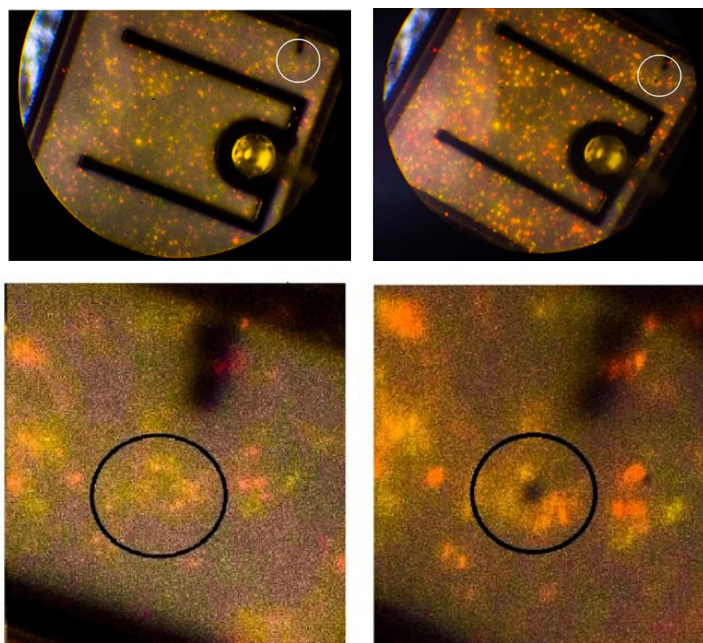


Рисунок 4.5 – Образование темного пятна после испытаний

Таким образом, доказано четвертое защищаемое положение: «На основании теплофизических расчетов было установлено, что возникающие вследствие протекания локальных токов с плотностью $150\text{--}200\text{ А/см}^2$ локальные области потемнения на полученных изображениях светящейся поверхности светоизлучающего диода на основе гетероструктуры InGaN/GaN при токе в диапазоне $(10^{-9}\text{--}10^{-6})\text{ А}$ после испытаний соответствуют каналам безызлучательной рекомбинации, образовавшимся вдоль пучка линейных дефектов. При значениях радиуса пучка линейных дефектов более $6\text{--}10\text{ мкм}$ локальный перегрев будет превышать $100\text{--}150$ 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».

Выводы по главе

1. Проведенные электротепловые расчеты и оценки величины перегрева показали, 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 существенно возрастает, а с увеличением рабочей плотности тока СИД величина перегрева может достигать опасных для работоспособности СИД величин при меньших диаметрах скоплений протяженных дефектов.

2. Показано, что термомеханические напряжения, возникающие при локальных перегревах гетероструктуры (более 100 градусов), недостаточны для генерации новых линейных дефектов (20 МПа при пределе упругости структуры порядка 100 ГПа), но достаточны для движения 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.

3. Показано, что величина температуры перегрева главным образом зависит от величины плотности тока возбуждения ЭЛ СИД и размеров кластеров дефектов, а наблюдаемое в экспериментах расширение темных областей, связано с движением множества дислокаций, находящихся вблизи области локального перегрева, и их группированием в кластеры, радиус которых впоследствии может превышать критическое значение и приводить к выходу прибора из строя [87].

4. С помощью данной методики расчета, зная геометрические размеры выходов одиночных дефектов и их скоплений, можно устанавливать оптимальную рабочую плотность тока.

5. Разработанный метод теплового расчета может стать основой для разработки методов неразрушающего контроля качества и обнаружения потенциально ненадежных светодиодов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описание физической картины

С помощью исследования свечения поверхности СИД при токе в диапазоне (10^{-9} – 10^{-6}) А, было подтверждено, что еще до испытаний наблюдается резко неоднородная картина сверхслабого свечения. Это может быть связано с начальной неоднородностью инжекции носителей, состава активной зоны, неоднородностью распределения микронеровностей подложки и структурных дефектов. Установлено, что наблюдаемое свечение имеет туннельно-рекомбинационную природу. Показано, что точечная составляющая свечения отражает планарное распределение сегментов, островков и квантовых точек, которые обусловлены флуктуациями стехиометрического состава пленки, а цвет излучения этих образований связан с флуктуациями концентрации индия [83, 84]. Постепенно меняющийся цвет фонового излучения с увеличением напряжения свидетельствует о туннельно-рекомбинационных процессах с участием хвостов состояний под квантовой ямой с энергией излучаемого кванта света $h\nu \approx eU$.

После кратковременных испытаний при небольших плотностях тока эта картина существенно сглаживалась.

Изменение картин свечения и сквозного тока утечки (начальные участки прямой ВАХ) после кратковременных испытаний обусловлено формированием электрического диполя на границе квантовых ям и буферных слоев вследствие образования локализованных зарядов на «хвостах» плотности состояний, характеризуемых энергией Урбаха.

Эти пространственные заряды, сформированные во время испытаний, экранируют влияние неоднородностей встроенных кристаллических полей, обусловленных спонтанной и пьезоэлектрической поляризацией. Это проявляется в особенностях изменения начальных участков ВАХ: сглаживанию нестабильностей ВАХ в диапазоне токов (10^{-9} – 10^{-6}) А, увеличение тока утечки и др.

Чтобы освободить эти заряды на границах гетероструктуры можно воздействовать на кристалл светом или повысить его температуру. Кроме того, разрушение таких образований может происходить и во время «отдыха» образца СИД (при его выключении).

Действительно, многочасовой отдых СИД после испытаний (нахождение в выключенном состоянии при комнатной температуре) приводит к некоторому эффекту «восстановления»: уменьшению тока утечки, уменьшению влияния электрических диполей, увеличению напряжения участка роста обратной ВАХ.

В процессе более длительных испытаний (1 месяц и более) продолжается образование дефектов горячими электронами, инжектированными в квантовые ямы (подпороговый механизм) [30]. Учитывая тот факт, что гетероструктура СИД на основе нитрида галлия характеризуется большой концентрацией линейных дефектов, в том числе пронизывающих активную область, можно считать, что с увеличением времени испытаний дислокации могут обрастать «атмосферой» из точечных дефектов [101]. В связи с этим, для описания дальнейшего развития процессов деградации можно воспользоваться моделью дислокационного шунта [87] – многопрыжкового туннелирования носителей заряда по дислокационной линии, пронизывающей область объемного заряда *p-n*-перехода. С возрастанием концентрации точечных дефектов проводимость таких каналов будет возрастать, что на начальных участках ВАХ СИД будет подтверждаться возникновением омической проводимости. Кроме того, образование омических каналов утечки тока может быть усилено активностью остаточных примесей и диффузией металла из *p*-электрода.

При развитии этих процессов часть электропроводящего шнура с омической электропроводностью «прокалывает» часть гетероструктуры, повышается напряженность поля в оставшихся квантовых ямах и увеличивается вероятность туннелирования электронов в них. При этом свечение синего цвета, обусловленное туннельно-рекомбинационными механизмами, наблюдается при напряжениях существенно менее 2,1 В (даже при напряжении 0,7 В). При полном

«проколе» локального участка активной области в этом месте появляется потемнение.

Чем больше возникнет центров безызлучательной рекомбинации, тем быстрее и сильнее разогревается активная зона светодиода, так как энергия, затрачиваемая для перехода носителей из одной зоны проводимости в другую, превращается в тепло. Что может привести к ускорению дальнейшей деградации, такой как диффузия атомов металла омических контактов в каналы предпочтительного зарядопереноса.

С увеличением времени наработки это приводит к разогреву этих областей и возникновению механических напряжений и дефектов. Процесс деградации протекает более интенсивно под электродами, чем на периферии (в отдалении от электродов), вследствие процесса «растекания» тока. Локальный перегрев ведет к нарушению структуры *p-n*-перехода и образованию в нем участков с повышенной электропроводностью, что способствует увеличению температуры перегрева, эрозии и отслоению электродов, и выходу светодиода из строя.

Таким образом, полученные результаты позволяют углубить знания о процессах деградации в СИД на основе гетероструктур InGaN и выявить закономерности изменения их характеристик в процессе испытаний для дальнейшего выбора оптимального щадящего режима работы СИД, а также эти результаты могут служить основой для входного контроля параметров СИД, диагностики начала интенсивных процессов деградации, обоснованного выбора оптимального режима СИД, и повышения качества и срока жизни конечного продукта на производстве.

Выполненные задачи

1. Был проведен анализ существующих в литературе данных о механизмах туннельно-рекомбинационных явлений в СИД с одной и множественными КЯ, а также методов исследования деградационных явлений в СИД.

2. Разработана экспериментальная установка и методика измерений, с использованием прецизионной измерительной техники, позволяющая визуально наблюдать картины распределения интенсивности и цветовые оттенки слабого

свечения СИД на основе нитрида галлия и проводить измерения ВАХ при токе в диапазоне (10^{-12} – 10^{-6}) А.

3. С помощью прецизионной измерительной техники проведены исследования ВАХ СИД в диапазоне токов (10^{-12} – 10^{-3}) А в зависимости от режимов и времени испытаний и выявлены изменения в ВАХ на более ранней стадии, что может служить основой для создания более чувствительных методик ранней диагностики деградационных явлений, а также позволяет более точно определять влияние встроенных кристаллических полей на процессы деградации.

4. 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.

5. Разработана методика, позволяющая на основании анализа характеристик туннельно-рекомбинационного свечения, наблюдаемого при токе в диапазоне (10^{-9} – 10^{-6}) А и напряжении менее 2,3 В, картин фотолюминесценции при ультрафиолетовой подсветке, а также начальных участков ВАХ осуществлять контроль качества структуры кристаллов СИД, контроль флуктуаций концентрации индия, возникающими при росте эпитаксиальных пленок (входной контроль), контроль динамики процессов дефектообразования в зависимости от режимов и времени испытаний, и которая может входить в основу методики ранней диагностики стадии развития деградационных явлений.

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 процессов деградации структуры от времени испытаний на основе модели дислокационного шунта – многопрыжкового туннелирования носителей заряда по дислокационной линии, пронизывающей область объемного заряда *p-n*-перехода.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- ВАХ – вольтамперная характеристика
- ВФХ – вольт-фарадная характеристика
- КТ – квантовая точка
- КЯ – квантовая яма
- МКЯ – множественные квантовые ямы
- ПО – программное обеспечение
- ПП – полупроводник
- ПЭВМ – персональная электронная вычислительная машина
- СИД – светоизлучающий диод
- ТРС – туннельно-рекомбинационное свечение
- УФ – ультрафиолет
- ФВЭ – фотовольтаический эффект
- ФЛ – фотолюминесценция
- ФП – фотопроводимость
- ФТ – фототок
- ЭЛ – электролюминесценция
- ЭСР – электростатический разряд

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шуберт, Ф. Е. Светодиоды / Ф. Е. Шуберт ; пер. с англ. под ред. А. Э. Юновича. – 2-е изд. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с. – ISBN 978-5-9221-0851-5.
2. Коган, Л. М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды / Л. М. Коган. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 208 с.
3. Берг, Ф. Светодиоды / Ф. Берг, П. Дин ; пер. с англ. под ред. А. Э. Юновича. – М. : Мир, 1979. – 686 с.
4. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов. В 2 кн. / С. Зи. – М. : Мир, 1984. – 456 с.
5. Никифоров, С. Г. Проблемы, теория и реальность светодиодов / С. Г. Никифоров // Компоненты и технологии. – 2005. – № 5. – С. 176–185.
6. Никифоров, С. Г. Почему светодиоды не всегда работают так, как хотят их производители? / С. Г. Никифоров // Компоненты и технологии. – 2005. – № 7. – С. 16–24.
7. Годовицын, И. В. Срок службы сверхъярких светодиодов. Причины отказов / И.В. Годовицын. – 2007. – URL: <http://www.bright-leds.ru/page-lifespan.html> (дата обращения: 06.06.2023).
8. Градобоев, А. В. Деградация параметров гетероструктур AlGaInP при облучении быстрыми нейтронами и гамма-квантами / А. В. Градобоев, К. Н. Орлова // Вопросы атомной энергетики. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2013. – № 2. – С. 64–66.
9. Интерференционные эффекты в спектрах электроотражения и электролюминесценции светодиодных гетероструктур InGaN/AlGaN/GaN / Л. П. Авакянц, П. Ю. Боков, А. В. Червяков [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т. 44, № 8. – С. 1124–1129.
10. Наблюдение локализованных центров с аномальным поведением в светоизлучающих гетероструктурах с множественными квантовыми ямами

InGaN/GaN / О. В. Кучерова, В. И. Зубков, А. В. Соломонов, Д. В. Давыдов // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т. 44, № 3. – С. 352–357.

11. Локализованные состояния в активной области голубых светодиодов, связанные с системой протяженных дефектов / Д. В. Давыдов, А. Л. Закгейм, Ф. М. Снегов [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2007. – Т. 33, № 4. – С. 11–18.

12. Электрические свойства и спектры люминесценции светодиодов на основе гетеропереходов InGaN/GaN с модулировано-легированными квантовыми ямами / С. С. Мамакин, А. Э. Юнович, А. Б. Ваттана, Ф. И. Маняхин // Физика и техника полупроводников. – 2003. – Т. 37, № 9. – С. 1131–1137.

13. Закгейм, А. Л. Исследование тепловых процессов в мощных InGaN/GaN флип-чип светодиодах с использованием инфракрасной тепловизионной микроскопии / А. Л. Закгейм, Г. Л. Курышев, М. Н. Мизеров // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т. 44, № 3. – С. 390–396.

14. Неоднородность инжекции носителей заряда и деградация синих светодиодов / Н. И. Бочкарева, А. А. Ефремов, Ю. Т. Ребане [и др.] // Физика и техника полупроводников. 2006. – Т. 40. – Вып. 1. – С. 122–127.

15. Defect generation in InGaN/GaN light-emitting diodes under forward and reverse electrical stresses / X. A Cao, P. M Sandvik, S. F. LeBoeuf, S. D. Arthur // Microelectronics Reliability. – 2003. – P. 1987–1991.

16. Huang L. Different degradation behaviors of InGaN/GaN MQWs blue and violet LEDs / L. Huang, T. Yu, Z. Chen and others // Journal of Luminescence. – 2009. – № 129. – P. 1981–1984.

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

18. 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.

19. Низкочастотный шум в исходных и деградировавших синих InGaAs/GaN-светодиодах / А. Л. Закгейм, М. Е. Левинштейн, В.П. Петров [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2012. – Т. 46, № 2. – С. 219–223.

20. Superbright Green InGaN Single-Quantum-Well-Structure Light-Emitting Diodes / S. Nakamura, M. Senoh, N. Iwasa [et al.] // Japanese Journal of Applied Physics. – 1995. – Vol. 34. – P. L1332–L1335.

21. Нойкин, Ю. М. Физические основы оптической связи : электронное учеб. пособие / Ю. М. Нойкин, П. В. Махно. – Ростов н/Д : Южный федеральный университет, 2011. – URL: <https://foos.sfedu.ru/>.

22. Ковалев, А. Н. Физика и технология наноструктурных гетерокомпозиций : учеб. / А. Н. Ковалев, О. И. Рабинович, М. И. Тимошина. – М. : МИСиС, 2015. – 459 с.

23. Бадгутдинов, М. Л. Спектры излучения гетероструктур с квантовыми ямами типа InGaN/AlGaN/GaN: модель двумерной комбинированной плотности состояний / М. Л. Бадгутдинов, А. Э. Юнович // Физика и техника полупроводников. – 2008. – Т. 42, № 4. – С. 438–446.

24. Shen, X. Q. Reduction of the threading dislocation density in GaN films grown on vicinal sapphire (0001) substrates / X. Q. Shen, H. Matsuhata, H. Okumura // Applied Physics Letters. – 2005. – N 86. – P. 021912.

25. Meneghesso, G. Recent results on the degradation of white LEDs for lighting / G. Meneghesso, M. Meneghini, E. Zanoni // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2010. – Vol. 43, N 43. – P. 354007.

26. Enhanced tunneling in GaN/InGaN multi-quantum-well heterojunction diodes after short-term injection annealing / A. Y. Polyakov, N. B. Smirnov, A. V. Govorkov [et al.] // Journal of Applied Physics. – 2002. – Vol. 91, N 8. – P. 5203–5207. – DOI: 10.1063/1.1465119.

27. Redistribution of multi-quantum well states induced by current stress in InGaN/GaN light-emitting diodes / L. Rigutti, L. Basirico, A. Cavallini, M. Meneghini [et al.] // Semiconductor Science and Technology. – 2009. – Vol. 24, N 5. – P. 055015.

28. Шмидт, Н. М. Изучение механизмов, ответственных за деградацию эффективности светодиодов на основе нитридов третьей группы / Н. М. Шмидт, А. С. Усиков, Е. И. Шабунина // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 46–53.

29. Полищук, А. Деградация полупроводниковых светодиодов на основе нитрида галлия и его твердых растворов / А. Полищук, А. Туркин // Компоненты и Технологии – 2008. – № 2. – С. 25–28.

30. Изменения люминесцентных и электрических свойств светодиодов из гетероструктур InGaN/AlGaN/GaN при длительной работе / А. Н. Ковалев, Ф. И. Маняхин, В. Е. Кудряшов [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т. 33, № 2. – С. 224–232.

31. Юнович, А. Э. Дивакансии азота – возможная причина желтой полосы в спектрах люминесценции нитрида галлия / А. Э. Юнович // Физика и техника полупроводников. – 1998. – Т. 32, № 10. – С. 1181–1183.

32. Басалкевич, Т. М. Особенности развития деградационного процесса в мощных синих светодиодах InGaN/GaN / Т. М. Басалкевич, Н. А. Тальнишних, Н. М. Шмидт // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского гос. политехн. ун-та. – 2012. – № 3 (153). – С. 45–48.

33. Механизм падения эффективности GaN-светодиодов с ростом тока / Н. И. Бочкарева, В. В. Вороненков, Р. И. Горбунов [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т. 44. – С. 822–828.

34. Бочкарева, Н. И. Падение эффективности GaN-светодиодов при высоких плотностях тока: туннельные токи утечки и неполная латеральная локализация носителей в квантовых ямах InGaN/GaN / Н. И. Бочкарева, Ю. Т. Ребане, Ю. Г. Шретер // Физика и техника полупроводников. – 2014. – Т. 48, № 8. – С. 1107–1116.

35. Спектры электролюминесценции ультрафиолетовых светодиодов на основе *p-n*-гетероструктур InGaN/AlGaN/GaN, покрытых люминофорами / Н. А. Гальцина, Л. М. Коган, Н. П. Социн [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2007. – Т. 41, № 9. – С. 1143–1148.

36. Heteroepitaxial technology for high-efficiency UV light-emitting diode / S. Kamiyama, M. Iwaya, H. Amano, I. Akasaki // *Opto-Electronics Review*. – 2002. – Vol. 10, N 4. – P. 225–230.

37. Taniyasu, Y. An aluminium nitride light-emitting diode with a wavelength of 210 nanometres / Y. Taniyasu, M. Kasu, T. Makimoto // *Nature*. – 2006. – Vol. 441. – P. 325–328.

38. Ponce, F. A. Nitride-based semiconductors for blue and green light-emitting devices / F. A. Ponce, D. P. Bour // *Nature*. – 1997. – Vol. 386, Issue 6623. – P. 351–359.

39. Закономерности изменения внешней квантовой эффективности InGaN/GaN зеленых светодиодов в процессе ускоренных испытаний / В. А. Сергеев, И. В. Фролов, А. А. Широков, О. А. Радаев // *Изв. вузов. Электроника*. – 2017. – Т. 22, № 2. – С. 220–230.

40. Спектры люминесценции голубых и зеленых светодиодов на основе многослойных гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN с квантовыми ямами» / К. Г. Золина, В. Е. Кудряшов, А. Н. Туркин, А. Э. Юнович // *Физика и техника полупроводников*. – 1997. – Т. 31, № 9. – С. 1055–1061.

41. Туннельные эффекты в светодиодах на основе гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN с квантовыми ямами / В. Е. Кудряшов, К. Г. Золина, А. Н. Ковалев [и др.] // *Физика и техника полупроводников*. – 1997. – Т. 31, № 11. – С. 1304–1309.

42. Спектры и квантовый выход излучения светодиодов на основе гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN с множественными квантовыми ямами – зависимость от тока и напряжения / В. Е. Кудряшов, С. С. Мамакин, А. Н. Туркин [и др.] // *Физика и техника полупроводников*. – 2001. – Т. 35, № 7. – С. 861–868.

43. Неразрушающая диагностика наногетероструктур с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN методом температурной спектроскопии адмиттанса / О. В. Кучерова, В. И. Зубков, Е. О. Цвелев [и др.] // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2010. – Т. 46, № 3. – С. 24–28.

44. Кучерова, О. В. Спектроскопия адмиттанса полупроводниковых гетероструктур с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN : автореф. дис. ... канд. физ. мат. наук: 01.04.10. / Кучерова Ольга Владимировна. – СПб., 2011. – 18 с.

45. Солтанович, О. А. Анализ температурных зависимостей вольт-фарадных характеристик светоизлучающих структур InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами / О. А. Солтанович, Е. Б. Якимов // Физика и техника полупроводников. – 2012. – Т. 46, № 12. – С. 1597–1603.

46. Солтанович, О. А. Частотные и температурные зависимости вольт-фарадных характеристик светоизлучающих структур InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами / О. А. Солтанович, Н. М. Шмидт, Е. Б. Якимов // Физика и техника полупроводников. – 2011. – Т. 45, № 2. – С. 226–229.

47. Зубков, В. И. Спектроскопия адмиттанса – эффективный метод диагностики полупроводниковых квантоворазмерных структур / В. И. Зубков // Приложение к журналу «Вестник РГРТУ». – 2009. – № 4.

48. Барановский, М. В. Фотоэлектрический метод диагностики гетероструктур InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами / М. В. Барановский, Г. Ф. Глинский, М. С. Миронова // Физика и техника полупроводников. – 2013. – Т. 47, № 1. – С. 60–64.

49. Карпович, И. А. Диагностика гетероструктур с квантовыми ямами методом спектроскопии конденсаторной фотоэдс / И. А. Карпович, Д. О. Филатов // Физика и техника полупроводников. – 1996. – Т. 30, № 10 – С. 1745–1755.

50. Карпович, И. А. Фотоэлектрическая диагностика квантово-размерных гетероструктур : учеб.-мет. материалы по программе повышения квалификации «Физико-химические основы нанотехнологий» / И. А. Карпович, Д. О. Филатов, А. П. Горшков. – Н. Новгород : ННГУ, 2007. – 87 с.

51. Карпович, И. А. Фотоэлектрическая спектроскопия квантоворазмерных гетеронаноструктур In(Ga)As/GaAs, выращенных газо-фазной эпитаксией / И. А. Карпович // Вестн. Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского. – 2010. – № 5(2). – С. 235–242.

52. Барановский, М. В. Экспресс-диагностика светодиодов на основе гетероструктур InGaN/GaN фотоэлектрическим методом / М. В. Барановский, Г. Ф. Глинский // Письма в ЖТФ. – 2013. – Т. 39, № 10. – С. 22–28.

53. Измерительный комплекс для диагностики качества светоизлучающих гетероструктур по фотоэлектрическому и оптическому отклику при локальном фотовозбуждении / В. А. Сергеев, С. В. Васин, И. В. Фролов, О.А. Радаев // Измерительная техника. – 2018. – № 9. – С. 49–53.

54. Measuring Complex for the Diagnostics of the Quality of Light-Emitting Heterostructures According to Photoelectric and Optical Responses Under Local Photoexcitation / V. A. Sergeev, S. V. Vasin, I. V. Frolov, O. A. Radaev // Measurement Techniques. – 2018. – Vol. 61, N 9. – P. 914–920.

55. High spatial uniformity of photoluminescence spectra in semipolar (20 $\bar{2}$ 1) plane InGaN/GaN quantum wells / K. Gelzinyte, R. Ivanov, S. Marcinkevicius [et al.] // Journal of Applied Physics. – 2015. – Vol. 117. – P. 023111.

56. Analyzing the physical properties of InGaN multiple quantum well light emitting diodes from nano scale structure / Y.-R. Wu, R. Shivaraman, K.-C. Wang, J. S. Speck // Applied Physics Letters. – 2012. – Vol. 101. – P. 083505.

57. Исследование гетероструктур с комбинированным слоем квантовых точек/квантовой ямы In(Ga)As/GaAs и delta-слоем Mn / Е. Д. Павлова, А. П. Горшков, А. И. Бобров [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2013. – Т. 47, № 12. – С. 1617–1620.

58. Carrier localization in In-rich InGaN/GaN multiple quantum wells for green light-emitting diodes / H. Jeong [et al.] // Scientific reports. – 2015. – Vol. 5. – P. 9373.

59. Spatially resolved imaging of the spectral emission characteristic of an InGaN/GaN multi-quantum well light-emitting diode by scanning electroluminescence microscopy / P. Fischer, J. Christen, M. Zacharias [et al.] // Japanese Journal of Applied Physics. – 2000. – Vol. 39, N 4 B. – P. 2414–2416.

60. Frolov, I. V. Change of the defects density distribution profile over the area of the InGaN/GaN light-emitting heterostructures during current tests / I. V. Frolov,

O. A. Radaev, V. A. Sergeev // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – Vol. 1697. – P. 012165.

61. Xu, L.-W. Qian. A Fast Method for Lifetime Estimation of Blue Light-Emitting Diode Chips Based on Nonradiative Recombination Defects / L.-W. Xu, K.-Y. Qian // *IEEE Photonics Journal*. – 2017. – Vol. 9(4). – P. 8201309.

62. Effects on LEDs during the Accelerated Ageing Test / V. Becirovic, V. Helac, B. Arslanagic, H. Samic // 2019, 18th International Symposium INFOTEH-JAHORNIA (INFOTEH), 20–22 March 2019, East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina.

63. Current-induced degradation and lifetime prediction of 310 nm ultraviolet light-emitting diodes / J. Ruschel, J. Glaab, B. Beidoun [et al.] // *Photonics Research*. – 2019. – Vol. 7(7). – P. B36–B40.

64. Xu, L. Aging mathematical model of InGaN/GaN LEDs based on non-radiative recombination / L. Xu, K. Qian // *AIP Conference Proceedings*. – 2017. – Vol. 1864. – P. 020172.

65. Degradation of InGaN laser diodes caused by temperature- and current-driven diffusion processes / C. De Santi, M. Meneghini, G. Meneghesso, E. Zanoni // *Microelectronics Reliability*. – 2016. – Vol. 64. – P. 623–626.

66. Оптическая деградация InGaN/GaN светоизлучающего диода, вызванная диффузией атомов примеси / И. В. Фролов, А. М. Ходаков, В. А. Сергеев, О. А. Радеев // *Материалы Междунар. науч.-техн. конф., 19–23 ноября 2018 г. INTERMATIC*. – 2018. – Ч. 1. – С. 33–36.

67. Сергеев, В. А. Модель деградации InGaN/GaN светодиода при токовых испытаниях с учетом неоднородного распределения температуры и плотности тока в гетероструктуре / В. А. Сергеев, А. М. Ходаков, И. В. Фролов // *РЭНСИТ*. – 2020. – Т. 12, № 3 – С. 329–334.

68. The model of degradation of an InGaN/GaN LED during current tests taking into account the inhomogeneous distribution of the defects density in the heterostructure / I. V. Frolov, A. M. Hodakov, V. A. Sergeev, O. A. Radaev // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 2103. – P. 012177.

69. Sergeev, V. A. Thermoelectric Models of High-Power Bipolar Semiconductor Devices. Part II. Nonlinear Model of LEDs / V. A. Sergeev, A. M. Khodakov // *Journal of Communications Technology and Electronics*. – 2015. – Vol. 60(12). – P. 1328–1332.

70. Исследование статистики носителей в светодиодных структурах InGaN/GaN / Д. С. Сизов, В. С. Сизов, Е. Е. Заварин, [и др.] // *Физика и техника полупроводников*. – 2005. – Т. 39, № 4. – С. 492–496.

71. Mukai, T. Characteristics of InGaN-Based UV/Blue/Green/Amber/Red Light-Emitting Diodes / T. Mukai, M. Yamada, S. Nakamura // *Japan Journal of Applied Physics*. – 1999. – Vol. 38. – P. 3976–3981.

72. Получение слоев GaN с пониженной плотностью дислокаций методом молекулярно-лучевой эпитаксии / А. Н. Алексеев, Д. М. Красовицкий, С. И. Петров, В. П. Чалый // *Физика и техника полупроводников*. – 2012. – Т. 46, № 11. – С. 1460–1462.

73. Нановключения InGaN в матрице AlGaIn / В. С. Сизов, А. Ф. Цацульников, В. В. Лундин // *Физика и техника полупроводников*. – 2008. – Т. 42, № 7. – С. 804–809.

74. Влияние легирования Eu на сенсбилизацию излучения в структурах с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs и InGaN/GaN / В. В. Криволапчук, М. М. Мездрогина, Р. В. Кузьмин, Э. Ю. Даниловский // *Физика твердого тела*. – 2009. – Т. 51, № 2. – С. 365–371.

75. Влияние давления в реакторе на свойства активной области InGaN/GaN светодиодов / В. В. Лундин, Е. Е. Заварин, М. А. Синицин [и др.] // *Физика и техника полупроводников*. – 2010. – Т. 44, № 1. – С. 126–129.

76. Оптические и рентгеноструктурные исследования многослойных структур на основе твердых растворов InGaN/GaN / С. О. Усов, А. Ф. Цацульников, Е. Е. Заварин [и др.] // *Физика твердого тела*. – 2009. – Т. 51, № 8. – С. 1523–1529.

77. InGaAlN гетероструктуры для светодиодов, выращенные на профилированных сапфировых подложках / В. В. Лундин, Е. Е. Заварин,

М.А. Сеницын, А. Е. Николаев // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т. 34, № 21. – С. 39–45.

78. Исследования оптических и структурных свойств короткопериодных сверхрешеток InGaN/GaN для активной области светоизлучающих диодов / Н. В. Крыжановская, В. В. Лундин, В. В. Николаев [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т. 44, № 6. – С. 857–863.

79. Использование короткопериодных сверхрешеток InGaN/GaN в светодиодах синего диапазона / В. С. Сизов, А. Ф. Цацульников, А. В. Сахаров [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т. 44, № 7. – С. 955–961.

80. Влияние релаксации напряжений на формирование активной области гетероструктур InGaN/(Al)GaN для светодиодов зеленого диапазона / А. В. Сахаров, В. В. Лундин, Е. Е. Заварин [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2009. – Т. 43, № 9. – С. 841–846.

81. Еханин, С. Г. Сверхслабое свечение и нестабильности микротоков в синих GaN-светодиодах при разных стадиях деградации / С. Г. Еханин, А. А. Томашевич // Прикладная физика. – 2021. – № 6. – С. 74–80.

82. 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.

83. Exciton localization in InGaN quantum well devices / S. Chichibu, T. Sota, K. Wada, S. Nakamura // Journal of Vacuum Science & Technology. – 1998. – В 16. – Р. 2204–2214.

84. Рабинович, О. И. Моделирование InGaN светодиодов / О. И. Рабинович, В. П. Сушков. – М. : МИСиС, 2007. – С. 810–818.

85. Исследование картин туннельной электролюминесценции / К. К. Слепцов, С. Л. Аржаков, Н. К. Афанасьев, А. А. Томашевич // Материалы междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов, молодых ученых, посвященной 55-летию ТУСУРа. – 2017. – Ч. 2. – С. 34–35.

86. 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. междунар. науч.-практ. конф. – 2017. – № 1-1. – С. 156–159.

87. 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.

88. Туркин, А. Н. Гетероструктуры GaN от Plessey Semiconductors / А. Н. Туркин // Полупроводниковая светотехника. – 2016. – № 2. – С. 42–46.

89. 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. междунар. науч.-практ. конф. – 2017. – № 1-1. – С. 172–175.

90. Spontaneous emission of localized excitons in InGaN single and multiquantum well structures / S. Chichibu, T. Azuhata, T. Sota, S. Nakamura // Applied Physics Letters. – 1996. – Vol. 69. – P. 4188.

91. 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. – Т. 1, № 1-1. – С. 105–108.

92. 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.

93. Томашевич, А. А. Исследование механизмов деградации полупроводниковых гетероструктур на основе нитрида галлия / А. А. Томашевич, С. Л. Аржаков, К. К. Слепцов // XIV International Conference of Students and Young

Scientists «Prospects of Fundamental Sciences Development», Томск, 2017. – 2017. – Т. 7. – URL: http://science-persp.tpu.ru/Arch/Proceedings_2017_vol_7.pdf.

94. 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.

95. Закгейм, Д. А. Высокомощные синие флип-чип светодиоды на основе AlGaInN / Д. А. Закгейм, И. П. Смирнова, И. В. Рожанский [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2005. – Т. 39, № 7. – С. 885–889.

96. 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 // INTERMATIC 2016 : материалы междунар. науч.-техн. конф. «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения». – М. – 2016. – Ч. 4. – URL: <http://conf.mirea.ru/CD2016/pdf/p4/35.pdf>

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

98. Еханин, С. Г. Определение температуры в центре токового шнура в слое NaCl в предпробивных электрических полях / С. Г. Еханин, Н. С. Несмелов, Л. Ю. Солдатова // Известия вузов. Физика. – 2011. – № 1–2. – С. 248–251.

99. Исследование физических свойств объемных монокристаллов нитрида галлия / В. А. Иванцов, В. А. Суховеев, В. И. Николаев [и др.] // Физика твердого тела. – 1997. – Т. 39, № 5. – С. 858–860.

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

101. Регель, В. Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В. Р. Регель, А. И. Слуцкер, Э. Е. Томашевский. – М. : Наука, 1974. – 560 с.

102. Арсенин, В. Я. Математическая физика / В. Я. Арсенин. – М. : ГРФМЛ, 1966. – 367с.

103. Справочник по специальным функциям / под ред. М. Абрамовица, И. Стиган. – М. : Наука, 1979. – 832 с.

Приложение А (справочное)**Акты внедрения**

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель генерального директора
по научной работе
АО «НИИПП»
А.В. Васильев
«05» октября 2023 г.

**АКТ О ВНЕДРЕНИИ**

результатов диссертационной работы Томашевича Александра
Александровича в производственный процесс

Выдан для предоставления в диссертационный Совет. Акт свидетельствует о том, что при совместных исследованиях АО «НИИПП» (г. Томск) и ТУСУР (г. Томск) по программе «Разработка оборудования и методик для комплексных исследований гетероструктур светоизлучающих диодов (СИД) с множественными квантовыми ямами (МКЯ) на основе нитрида галлия» проводится апробация и внедрение результатов кандидатской диссертации Томашевича Александра Александровича «Процессы дефектообразования в гетероструктуре GaN-светодиодов с множественными квантовыми ямами». Методика эксперимента, приведенная в диссертации для исследований туннельно-рекомбинационного свечения и ВАХ СИД на основе InGaN/GaN с МКЯ в диапазоне токов (10^{-9} – 10^{-6}) А, используется при проведении контроля качества гетероструктур СИД по картинам планарного распределения интенсивности и цветности туннельно-рекомбинационного свечения и по начальным участкам вольтамперных характеристик.

И.о. начальника 110 отдела АО «НИИПП»,
С.А. Санько
«05» октября 2023 г.





УТВЕРЖДАЮ
 Проректор по научной работе и инновациям,
 кандидат технических наук, доцент
 А. Г. Лоцилов
 «03» 10 2023 г.

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертационной работы Томашевича Александра Александровича в учебный процесс кафедры Конструирования узлов и деталей РЭА (КУДР)

Выдан для предоставления в диссертационный Совет, свидетельствующий о том, что на кафедре КУДР ТУСУР (г. Томск) в учебный процесс, научно-исследовательскую работу студентов и при подготовке магистрантов были внедрены следующие результаты кандидатской диссертации Томашевича Александра Александровича «Процессы дефектообразования в гетероструктуре GaN-светодиодов с множественными квантовыми ямами»:

1. Методика эксперимента, приведенная в диссертации для исследований параметров туннельно-рекомбинационного свечения и вольтамперных характеристик светоизлучающих диодов с множественными квантовыми ямами в диапазоне токов (10^{-9} – 10^{-6}) А, используется при проведении лабораторных работ по курсу «Методы диагностики полупроводниковых структур», в научно-исследовательской работе студентов (НИРС).

2. Программа для ЭВМ по анализу RGB-изображения светящейся поверхности СИД для контроля его качества (номер регистрации свидетельства 2023619280, дата регистрации 10.05.2023) используется при проведении исследований в процессе подготовки выпускных квалификационных работ бакалаврами и магистрантами и при выполнении НИРС.

Зам. заведующего кафедрой КУДР,
 к.т.н., доцент
 С.А. Артишев
 «03» октября 2023 г.

Приложение Б (справочное)

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU

2023619280

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):

[2023619280](#)

Дата регистрации: **10.05.2023**

Номер и дата поступления заявки:

2023618035 27.04.2023

Дата публикации: [10.05.2023](#)

Авторы:

**Степанова Анастасия Сергеевна (RU),
Еханин Сергей Георгиевич (RU),
Пащенко Антон Константинович (RU),
Томашевич Александр Александрович (RU)**

Правообладатель:

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Томский государственный университет систем
управления и радиотехники» (RU)**

Название программы для ЭВМ:

Программа анализа RGB изображения светящейся поверхности СИД для контроля его качества

Реферат:

Программа предназначена для автоматизационного анализа цифровых изображений светящейся поверхности светоизлучающих диодов. Программное обеспечение выполняет следующие функции: загрузка цифровых изображений формата JPG; вывод цифровых изображений на рабочую панель; подсчет и вывод на лицевую панель общего количества пикселей анализируемых изображений; подсчет и вывод на лицевую панель количества пикселей зеленого цвета анализируемых изображений; подсчет и вывод на лицевую панель количества пикселей зеленого цвета анализируемых изображений в процентах. Тип ЭВМ: IBM PC-совмест. ПК. ОС: Windows 7/8/10.

Язык программирования: C

Объем программы для ЭВМ: 32 КБ

Приложение В (справочное)

Расчет температурных режимов переноса зарядов активной области гетероструктуры InGaN/GaN в приближении плоского и цилиндрического источников тепла

Решение уравнения (4.2 из главы 4), представимо в виде интеграла [102]:

$$\delta T(x, y, z, t) = \int_0^t \iiint f(\xi, \eta, \varepsilon, \tau) G(x, y, z, \xi, \eta, \varepsilon, t - \tau) d\xi \cdot d\eta \cdot d\varepsilon \cdot d\tau, \quad (\text{ПВ.1})$$

где G -функция Грина для бесконечного пространства.

Если ось Z направлена по оси теплового источника, задача определения температуры в слое материала (4.1), (4.2), (4.3) является двумерной.

«Двухмерная» функция Грина имеет вид:

$$G(x, y, \xi, \eta, t - \tau) = \left[\frac{1}{\sqrt{4\pi a(t - \tau)}} \right]^2 \cdot \exp \left[\frac{-(x - \xi)^2 - (y - \eta)^2}{4a(t - \tau)} \right]. \quad (\text{ПВ.2})$$

Так как мощность источника f с момента включения ($t > 0$) не зависит от времени, при подстановке функции (ПВ.2) в (ПВ.1) можно сделать замену $(t - \tau)$ на τ . Тогда, в цилиндрической (полярной) системе координат $(x, y) \rightarrow (r, \varphi)$; $(\xi, \eta) \rightarrow (\rho, \psi)$, а выражение (ПВ.1) запишется в виде:

$$\delta T(r, \varphi, t) = \frac{1}{4\pi a} \int_0^t \int_0^\infty \frac{1}{\tau} e^{-\frac{\rho^2 + r^2}{4a\tau}} \cdot \rho \left[\int_0^{2\pi} f(\rho, \psi) e^{-\frac{2\rho r \cos(\psi - \varphi)}{4a\tau}} d\psi \right] \cdot d\rho \cdot d\tau. \quad (\text{ПВ.3})$$

Но согласно условию $f(r) = \begin{cases} f_0, & r < R \\ 0, & r > R \end{cases}$ (см. подразд. 4.1) $f(\rho, \psi) \equiv f(\rho)$

не зависит от ψ .

В этом случае переменную φ можно переместить из подынтегрального выражения в пределы интегрирования:

$$\delta T(r, \varphi, t) = \frac{1}{4\pi a} \int_0^t \int_0^\infty \frac{1}{\tau} e^{-\frac{\rho^2 + r^2}{4a\tau}} \rho \cdot f(\rho) \left[\int_{-\varphi}^{2\pi - \varphi} e^{-\frac{2\rho r \cos(\psi - \varphi)}{4a\tau}} d\psi \right] \cdot d\rho \cdot d\tau. \quad (\text{ПВ.4})$$

Поскольку в квадратных скобках стоит интеграл от периодической функции, а интегрирование проводится по периоду, результат не зависит от начального значения интегрирования, т.е. от φ , и можно положить $\varphi = 0$.

Физически это означает, что изотропный источник тепла приводит к изотропному распределению температуры $T(r, \varphi, t) \equiv T(r, t)$.

Согласно [103]

$$\int_0^{2\pi} e^{\pm z \cdot \cos \Theta} d\Theta \equiv 2\pi I_0(z), \quad (\text{ПВ.5})$$

где $I_0(z)$ – модифицированная функция Бесселя, поэтому (ПА.4) можно записать в виде:

$$\delta T(r, t) = \frac{1}{2a} \int_0^t \int_0^\infty \frac{1}{\tau} e^{-\frac{\rho^2 + r^2}{4a\tau}} \rho \cdot f(\rho) I_0\left(\frac{2\rho r}{4a\tau}\right) \cdot d\rho \cdot d\tau. \quad (\text{ПВ.6})$$

Полагая в (ПА.6) $r = 0$, найдем температуру в центре токового шнура:

$$\delta T(0, t) = \frac{1}{2a} \int_0^t \int_0^\infty \frac{1}{\tau} e^{-\frac{\rho^2}{4a\tau}} \rho \cdot f(\rho) \cdot d\rho \cdot d\tau. \quad (\text{ПВ.7})$$

Для функции $f(r)$, данной в выражении (4.1, глава 4) получим окончательное выражение:

$$\delta T(0, t) = f_0 \left(t - \int_0^t e^{-\frac{R^2}{4a\tau}} d\tau \right). \quad (\text{ПВ.8})$$

Выражение (ПА.8) можно упростить:

$$T(0,t) = f_0 t \left[1 - E_2 \left(\frac{R^2}{4at} \right) \right]. \quad (\text{ПВ.9})$$