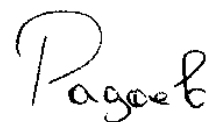


На правах рукописи



РАДАЕВ Олег Александрович

**СПОСОБЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ПОРОГОВЫХ
И ПРЕДЕЛЬНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ СВЕТОДИОДОВ**

**Специальность 2.2.4. Приборы и методы измерения
(электрические и магнитные величины)
(технические науки)**

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ульяновск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ульяновский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Сергеев Вячеслав Андреевич,**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты **Антонец Иван Васильевич,**
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Ульяновский институт гражданской
авиации имени Главного маршала авиации
Б. П. Бугаева», профессор кафедры авиационной
техники

Клюев Алексей Викторович,
доктор физико-математических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского», профессор кафедры
радиотехники

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Научно-технологический центр
микроэлектроники и субмикронных
гетероструктур Российской академии наук
(г. Санкт-Петербург)

Защита состоится 23 декабря 2025 г. в _____ часов на заседании
диссертационного совета 24.2.357.01 в федеральном государственном бюджетном
образовательном учреждении высшего образования «Пензенский государственный
университет» по адресу: 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Пензенский государственный университет» и на сайте:
https://dissov.pnzgu.ru/ecspertiza/Tehnicheskie_nauki/radaev

Автореферат разослан «____» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Светлов Анатолий Вильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Светоизлучающие диоды (светодиоды, СИД) находят все более широкое применение в системах индикации, подсветки, навигации, передачи информации и др. Несмотря на постоянное совершенствование технологий изготовления светоизлучающих гетероструктур (СГС) одной из ключевых проблем остается снижение энергетической эффективности и деградация электрооптических характеристик светоизлучающих приборов на их основе при эксплуатации.

С целью повышения физической и функциональной надежности технических устройств и систем с использованием СИД активно разрабатываются способы и средства неразрушающего контроля их качества и оценки надежности. Ведется активный поиск и исследование характеристик и параметров СИД, чувствительных к дефектам СГС. В качестве диагностических параметров в работах С.Г. Никифорова, Н.И. Бочкаревой, Ф.И. Маняхина, В.И. Зубкова, О.П. Толбанова и др. предлагаются параметры вольт-амперных (ВАХ) и вольт-фарадных (ВФХ) характеристик СИД. В работах И.А. Карповича, М.В. Барановского, Г.Ф. Глинского, В.А. Сергеева, Li Q., Liu L., Wang W и др. для контроля качества и однородности СГС предлагается использовать параметры фотоотклика. Большое число работ посвящено исследованию тепловых и шумовых характеристик СИД.

В работах А.В. Градобоева, Е.И. Шабуниной, Н.М. Шмидт, С. Румянцева, S. Sawyer, M. Meneghini, X. Cao показано, что наиболее чувствительными к дефектам СГС являются параметры СИД, измеренные в области малых токов, такие как пороговый ток и граничная частота модуляции электролюминесценции СИД. Сложность и особенности измерения этих параметров в области малых токов определяются необходимостью преобразования слабого оптического излучения в электрический сигнал, принципиальной невозможностью разделения постоянной и переменной составляющих оптического излучения, малостью полезных электрических сигналов и сложностью их выделения на фоне сигналов постоянного уровня.

Так называемый пороговый ток или ток появления свечения в работах Н.С. Аверкиева, М.Е. Левинштейна, П.В. Петрова, Carlo De Santi, Matteo Buffolo, Nicola Renzo и др. определялся по минимальной мощности излучения СИД, которая могла быть зарегистрирована используемым в работе фотоприемником. При этом объективный параметр СИД оказывается зависимым от пороговой чувствительности фотоприемника, а оценки погрешностей измерения этого параметра в литературе не приводятся.

При измерении граничной частоты электролюминесценции через СИД пропускают сумму постоянного и гармонического тока малой амплитуды и регистрируют переменную составляющую оптического излучения фотоприемным устройством. При регистрации слабых оптических сигналов большое влияние на результат измерений оказывают аддитивные шумы фотоприемника, а при увеличении амплитуды переменной составляющей тока возникают нелинейные искажения, обусловленные нелинейностью ВАХ и ватт-амперной (ВтАХ) характеристик СИД и вносящие погрешности в результат измерений.

Таким образом, для повышения достоверности оценки функциональных возможностей, качества и надежности СИД необходимо повышать точность измерения порогового тока и граничной частоты электролюминесценции.

Цель работы – повышение точности и достоверности измерения порогового тока и граничной частоты электролюминесценции СИД в диапазоне малых токов для задач диагностики их качества и прогнозирования надежности.

Для достижения поставленной цели решаются **задачи**:

1. Обзор и анализ известных способов и средств измерения статических и динамических параметров электролюминесценции СИД при малых токах.
2. Разработка способа объективного определения значения порогового тока СИД, не зависящего от чувствительности фотоприемного устройства.
3. Разработка экспериментальной автоматизированной установки для измерения ВтАХ СИД в диапазоне малых токов и определения порогового тока по результатам их измерения.
4. Анализ и оценка составляющих погрешности измерения граничной частоты электролюминесценции СИД при малых токах в зависимости от уровня тестового сигнала, обусловленных нелинейностью ВтАХ и влиянием шума фотоприемного устройства.
5. Проведение испытаний СИД под действием токовых нагрузок для выявления корреляционных связей значений пороговых токов и граничных частот электролюминесценции с качеством СГС и темпом деградации оптической мощности при испытаниях.

Методы исследований. При выполнении работы использовались методы теории погрешностей, теории радиотехнических цепей и сигналов, методы спектрального анализа, физики полупроводниковых приборов. При разработке программного обеспечения использовался язык программирования С#. Обработка результатов эксперимента осуществлялась с использованием стандартных программ MS Office, MatLAB и оригинальных программ, разработанных в среде визуального программирования LabView.

Научная новизна работы.

1. Разработан защищенный патентом на изобретение способ определения порогового тока СИД по результатам измерения и аппроксимации его ВтАХ независимый от чувствительности фотоприемного устройства с погрешностью не более 5%; разработанный способ применим для измерения порогового тока отдельных кристаллов светодиодных матриц.
2. Установлено, что погрешность определения порогового тока СИД при аппроксимации его ВтАХ функцией вида $P_{ABC}(I) = \frac{m}{2} \left(\sqrt{1 + 2q(I - I_{th})} - 1 \right)^2$ при отношении сигнал/шум 35 дБ в 2,7 раза меньше, чем при аппроксимации ВтАХ общепринятой функцией вида $P(I) = P_0 \cdot (I/I_0)^b$
3. Получено выражение для определения значения амплитуды гармонического сигнала, при котором суммарная относительная погрешность измерения граничной частоты электролюминесценции СИД, обусловленная влиянием шума фотоприемного устройства и нелинейностью ВтАХ СИД, принимает минимальное значение.
4. Установлена связь порогового тока со степенью дефектности структуры СИД. Показано, что при испытаниях в режиме постоянного тока СИД с большими значениями порогового тока деградируют быстрее. Коэффициент корреляции между значениями порогового тока СИД и темпом спада мощности составляет 0,9.

5. Показано, что при отбраковке потенциально ненадежных СИД, склонных к ускоренной деградации, по пороговому току вероятность ошибки второго рода в 1,7 раза меньше, чем при отбраковке по прямому падению напряжения.

Практическая значимость работы.

1. Способ и установка для измерения порогового тока СИД могут быть использованы для разделения СИД по уровню дефектности на входном контроле на предприятиях-изготовителях продукции с использованием СИД и светодиодных матриц.

2. При отбраковке СИД по пороговому току вероятность ошибок второго рода (пропуска потенциально ненадежных приборов) в 1,7 раз меньше, чем при отбраковке известным способом по прямому падению напряжения. Использование методики отбраковки потенциально ненадежных СИД по пороговому току на стадии входного контроля позволяет повысить надежность светотехнических устройств на основе СИД.

3. Экспериментальные результаты исследования изменений пороговых токов и граничных частот электролюминесценции СИД под действием внешних факторов использованы для разработки способа определения СИД, склонных к ранней деградации.

4. Установка для измерения порогового тока СИД, реализующая способ измерения по патенту № 2807500 РФ, внедрена на входном контроле АО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения».

5. Результаты диссертационной работы использованы в Ульяновском филиале Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук при проведении исследований по тематическому плану НИР и выполнении проектов «Диагностика дефектности светоизлучающих InGaN/GaN гетероструктур по параметрам пространственной неоднородности динамических характеристик электролюминесценции» (РФФИ, проект №19-07-00562, 2019-2021 годы), «Модификация электрофизических и оптических характеристик светодиодов под воздействием импульсов тока повышенной плотности и импульсного лазерного излучения» (РФФИ, проект №19-47-730002, 2019-2022 годы), «Исследование механизмов деградации светоизлучающих InGaN/GaN наногетероструктур под действием токовых и температурных нагрузок» (РФФИ, проект № 16-32-60051, 2016-2018 годы), «Диагностика качества гетеропереходных InGaN/GaN и AlGaIn/GaN светодиодов методами динамической фотоэлектрической спектроскопии» (РФФИ, проект №16-47-732159). Результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе на радиотехническом факультете Ульяновского государственного технического университета при проведении занятий по дисциплинам «Элементы и устройства оптоэлектроники» и «Оптические измерения», а также при выполнении НИР по проекту FEUF-2023-0003 Ульяновского государственного университета «Развитие перспективных нелинейно-оптических подходов к разработке генераторов излучения специальных диапазонов для использования в биофотонике, медицине и сенсорике».

Практическая значимость работы подтверждена актами об использовании и внедрении результатов.

Положения, выносимые на защиту.

1. Аппроксимация V_{tAX} СИД в диапазоне малых токов функциями вида $P(I) = F[a_k, (I - I_{th})]$, где I_{th} – параметр функции, позволяет получить объективную оценку значения порогового тока СИД независимо от шумов и чувствительности фотоприемного устройства путем экстраполяции функции $P(I)$ до значения $P=0$.

2. Аппроксимация ВтАХ СИД, измеренной в диапазоне малых токов, функцией вида $P_{ABC}(I) = \frac{m}{2} \left(\sqrt{1 + 2q(I - I_{th})} - 1 \right)^2$ позволяет определить значение порогового тока с наименьшей погрешностью по сравнению с общепринятой функцией.

3. Погрешность измерения граничной частоты электролюминесценции СИД в диапазоне малых токов зависит от амплитуды тестового гармонического сигнала. Существует значение амплитуды, при котором суммарная относительная погрешность измерения граничной частоты электролюминесценции СИД, обусловленная влиянием шума фотоприемного устройства и нелинейностью ВтАХ, принимает минимальное значение. При увеличении амплитуды тестового сигнала на 10% относительно амплитуды, при которой достигается минимум суммарной погрешности, увеличение погрешности составляет порядка 1%.

4. Значение порогового тока определяется степенью дефектности гетероструктуры СИД, сильно коррелирует ($r=0,9$) с темпом спада мощности их излучения в процессе испытаний и может использоваться в качестве диагностического и прогнозирующего параметра. СИД, значения порогового тока которых меньше среднего значения в выборке, характеризуются меньшими концентрациями дефектов в активной области и меньшим темпом спада мощности излучения при токовых испытаниях.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийской молодежной научной конференции «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники» (г. Ульяновск, 2015–2023 гг.), Всероссийской конференции молодых ученых «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (г. Саратов, 2015–2023 гг.), международной школе-конференции «Saint-Petersburg OPEN» (г. Санкт-Петербург, 2016–2024 гг.), международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (г. Саратов, 2018, 2020, 2022 гг.), Международная научно-техническая конференция INTERMATIC (г. Москва, 2013–2018 гг.), Международной конференции и молодежной школе «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ) (г. Самара, 2022, 2023 гг.).

Личный вклад автора. Основные результаты диссертационной работы, включая разработку способа и методики определения порогового тока СИД, расчеты погрешностей измерения граничной частоты электролюминесценции при малых токах, разработку измерительных установок и проведение измерений, получены автором лично. Обсуждение и интерпретация экспериментальных результатов проводились при его непосредственном участии.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 35 работ, в том числе: 4 работы в изданиях из перечня ВАК, 11 работ в изданиях, индексируемых в WoS и Scopus, 17 работ в прочих изданиях, получено 3 патента на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 118 наименований, трех приложений. Общий объем диссертации составляет 132 страницы, включая 14 таблиц и 60 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлено краткое обоснование актуальности темы диссертации, определены цель и задачи исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, и их научная новизна, показана теоретическая и практическая значимость результатов работы, представлена информация апробации результатов работы.

В первой главе представлен обзор методов и средства измерения пороговых и динамических характеристик СИД, и их связь с качеством и надежностью изделий.

В работах Meneghini, Changfu, Robert Herrick показано, что наиболее чувствительным к дефектам гетероструктуры является начальный участок ВтАХ СИД (при рабочих токах, не превышающих 1 мА), а также значения порогового тока и граничной частоты при малых токах связаны с концентрацией дефектов светодиодной гетероструктуры.

Пороговый ток принято определять как минимальный прямой ток, при котором удастся зарегистрировать излучение СИД современными фотоприемными устройствами. Любое фотоприемное устройство имеет порог чувствительности, ограниченный шумами фоточувствительного элемента и усилительного каскада. Поэтому значение порогового тока, определяемого таким образом, зависит от предельной чувствительности фотоприемника, при этом погрешности измерения порогового тока таким способом не оценивались. Для повышения достоверности необходимо разработать способ объективного определения значения порогового тока СИД, не зависящего от чувствительности фотоприемного устройства, и оценить погрешности определения порогового тока.

Пороговый ток характеризует потери на безызлучательную рекомбинацию в системе дефектов, пронизывающих активную область СИД, следовательно, характеристики выборочных распределений СИД по значениям порогового тока могут быть использованы для оценки качества светоизлучающей гетероструктуры. Однако исследований связи порогового тока со скоростью деградации характеристик СИД при испытаниях и возможности оценки надежности СИД по значениям порогового тока не проводилось.

Динамические свойства электролюминесценции СИД характеризует граничная частота электролюминесценции. Согласно определению, граничная частота электролюминесценции f_{3dB} — это частота, при которой амплитуда переменной составляющей мощности оптического излучения СИД уменьшается в два раза (на 3 дБ) относительно значения, измеренного при низкой частоте (порядка 1 кГц). Общепринятый метод измерения граничной частоты электролюминесценции заключается в измерении частотной зависимости мощности оптического излучения СИД при пропускании через него суммы постоянного и переменного гармонического тока в диапазоне частот от нескольких кГц до десятков МГц. При измерении слабых оптических сигналов в области малых токов существенное влияние на результат измерения оказывают шумы фотоприемного устройства (шум усилителя, шум фотодиода и т.д.). Увеличение амплитуды тестового сигнала приводит к нелинейным искажениям переменного оптического сигнала. При этом погрешности, которые возникают при измерении граничной частоты общепринятым методом в диапазоне малых токов, не оценивались.

Обзор литературы показал, что нормативные требования к измерению электрических и энергетических характеристик СИД в диапазоне малых токов

отсутствуют, а точность существующих методов недостаточна для достоверной отбраковки дефектных приборов. Несмотря на то, что граничная частота, измеренная при малых токах, и пороговый ток СИД чувствительны к дефектам структуры, исследования возможности использования данных параметров для отбраковки потенциально ненадежных светодиодов не проводились. Для разработки эффективных способов и средств неразрушающего контроля качества и оценки предельных динамических параметров СИД необходимо повышать точность и достоверность измерения граничных частот электролюминесценции СИД при малых токах.

Во второй главе проведен анализ требований к средствам измерения ВтАХ и динамических характеристик светодиодов в области малых токов, описаны способ и экспериментальная установка для определения порогового тока СИД предложенным способом.

Согласно разработанному способу, пороговый ток определяется путем измерения ВтАХ СИД $P(I)$ в области малых токов, аппроксимации полученной зависимости и определения порогового тока I_{th} как тока, при котором аппроксимирующая функция принимает нулевое значение (рис. 1).

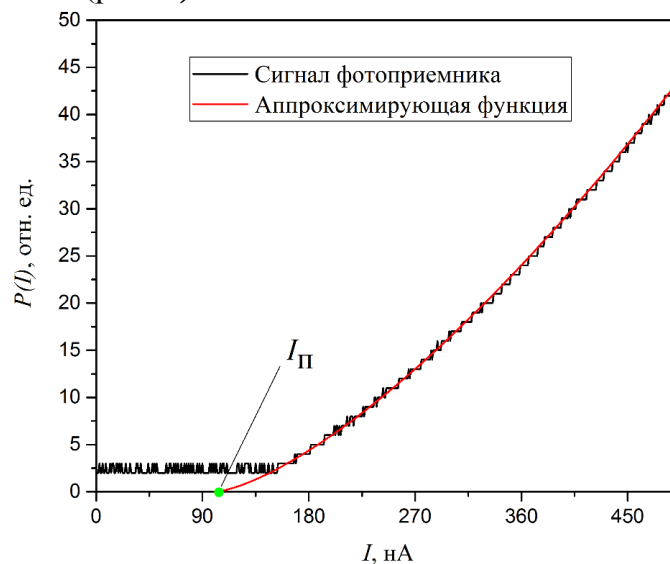


Рисунок 1 – Графики, поясняющие принцип определения значения порогового тока светодиода

Для обоснования выбора вида аппроксимирующей функции было проведено исследование точности аппроксимации ВтАХ СИД разными функциями при различных уровнях шума фотоприемного устройства.

В работах Фролова И.В., Сергеева В.А. показано, что при отсутствии утечки носителей заряда из активной области ВтАХ СИД при малых токах, соответствующих диапазону роста внешней квантовой эффективности, может быть аппроксимирована функцией вида

$$P_{ABC}(I) = \frac{m}{2} \left(\sqrt{1 + 2qI} - 1 \right)^2, \quad (1)$$

где $m = \eta_{extr} V \frac{hc}{\lambda} \frac{A^2}{2B}$, $q = \frac{\eta_{inj}}{eV} \frac{2B}{A^2}$, A – коэффициент безызлучательной рекомбинации, B – коэффициент излучательной рекомбинации, λ – длина волны излучения, h – постоянная Планка; c – скорость света в вакууме, η_{inj} – коэффициент инжекции носителей заряда в

активную область, V – объем активной области, e – заряд электрона, параметр q имеет размерность $[A^{-1}]$ и определяет степень нелинейности ВТАХ СИД.

В работах М. Meneghini, D.S. Meyaard, E.F. Schubert, Н.М. Шмидт, К.Н. Орловой для аппроксимации ВТАХ СИД используется функция вида $P(I) = P_0 \cdot (I/I_0)^b$. Для идеального СИД показатель степени a равен 1. У реального СИД значение показателя степени зависит от тока.

Для определения порогового тока в аппроксимирующие функции был добавлен искомый параметр I_{th} :

$$P_{power}(I) = a(|I - I_{th}|)^b, \quad (2)$$

$$P_{ABC}(I) = \frac{m}{2} \left(\sqrt{1 + 2q(I - I_{th})} - 1 \right)^2. \quad (3)$$

Функции (2) и (3) имеют ограничения по выбору диапазона токов: функция $P_{ABC}(I)$ может применяться при токах, не превышающих 100 мкА, а показатель степени b функции $P_{power}(I)$ зависит от тока. Поэтому погрешность определения порогового тока зависит не только от уровня шума фотоприемного устройства, но и от количества точек, используемых для аппроксимации.

Для измерения ВТАХ СИД разработана установка, структурная схема которой приведена на рис. 2.

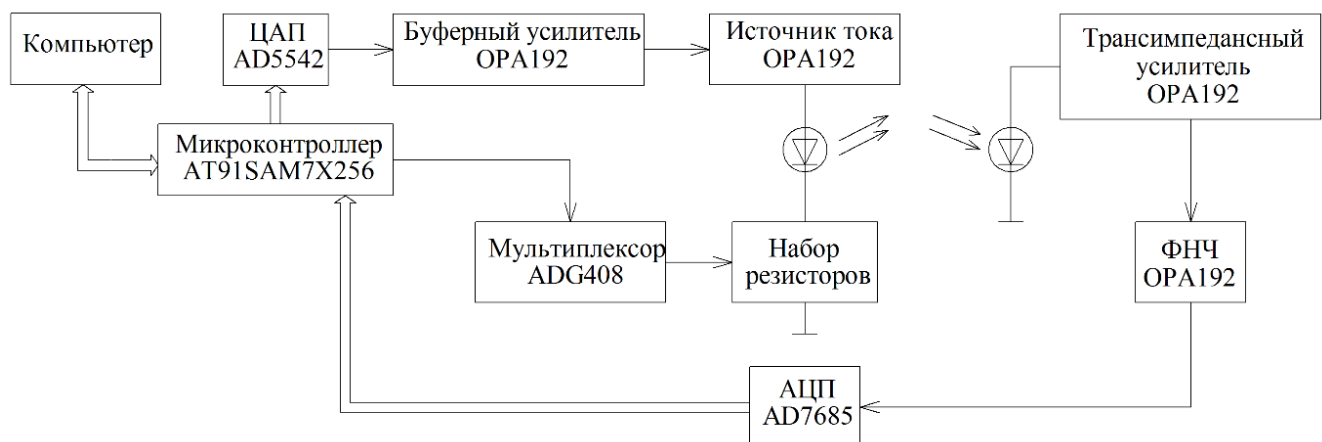


Рисунок 2 – Структурная схема установки для измерения порогового тока светодиодов

Управление аппаратной частью осуществляется компьютером через UART интерфейс. При запуске цикла измерения микроконтроллер AT91SAM7X256 выдает код, в результате чего цифроаналоговый преобразователь AD5542 формирует опорное напряжение для источника тока на операционном усилителе (ОУ) ОРА192 в диапазоне 0 – 3 В. Мультиплексор предназначен для переключения нагрузочных прецизионных резисторов, с помощью которых задается ток через исследуемый СИД.

Маломощный трансимпедансный усилитель на ОУ ОРА192 преобразует фототок фотодиода, пропорциональный интенсивности излучения СИД, в электрический сигнал, который после сглаживания фильтром нижних частот (ФНЧ) преобразуется АЦП AD7685 в числовой код и через микроконтроллер передается в компьютер. Аппроксимация результатов измерения ВТАХ СИД и вычисление порогового тока производится компьютерной программой в среде MatLab.

Основные характеристики установки: диапазоны изменения тока через СИД 0 нА – 60 мкА, 100 нА – 300 мкА, 1 мкА – 3 мА; минимальный шаг изменения тока 1 нА для диапазона тока 0 – 60 мкА; погрешность установки тока $\pm 0.5 \%$ для диапазона тока 0 – 60 мкА; минимальная регистрируемая мощность излучения фотоприемным устройством равна 34 пВт.

Для определения диапазона тока, в котором функции (2) и (3) аппроксимируют ВтАХ с наименьшим средним квадратическим отклонением (СКО), была измерена ВтАХ синего СИД фирмы Cree (рис. 3) и рассчитаны значения СКО аппроксимирующих функций от результатов измерений ВтАХ в различных диапазонах тока. Установлено, что в диапазоне тока свыше 1 мкА погрешность аппроксимации ВтАХ обеими функциями возрастает с увеличением числа отсчетов, а при токах меньше 1 мкА–СКО остается постоянным.

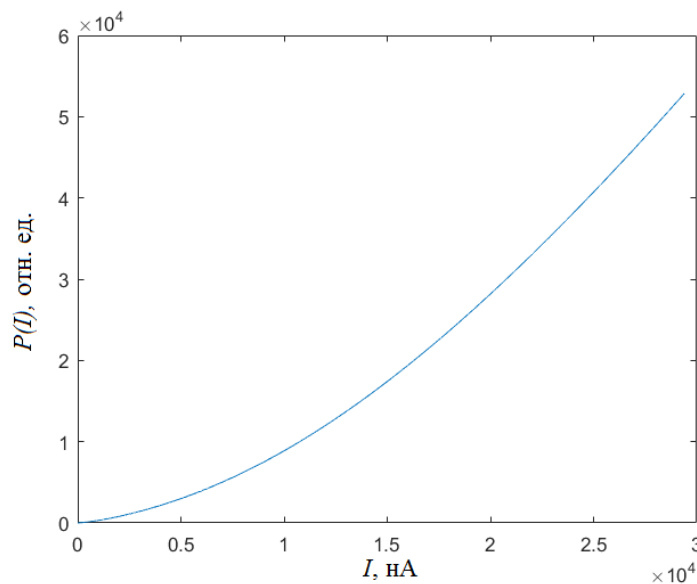


Рисунок 3 – Результат измерения ватт-амперной характеристики $P(I)$ синего светодиода

Для сравнения погрешностей определения значений порогового тока СИД при различных аппроксимирующих функциях проведено компьютерное моделирование, заключающееся в многократном добавлении случайного шума с нормальным законом распределения к измеренной ВтАХ и определении порогового тока с использованием функций $P_{ABC}(I)$ и $P_{power}(I)$. При разных значениях отношения сигнал-шум определялись следующие параметры:

1. Пороговый ток I_{th} .
2. СКО аппроксимирующей кривой от измеренной ВтАХ, которое показывает, насколько точно функция аппроксимирует исходные данные.
3. СКО значений порогового тока, которое показывает степень разброса значений порогового тока относительно среднего значения.

В таблице 1 представлены результаты оценки погрешностей определения порогового тока.

Таблица 1 – Результаты исследования зависимости порогового тока от уровня шума

Отношение сигнал/шум, дБ	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60
		Функция $P_{ABC}(I)$									
I_{th} , нА	115,84	21,52	49,99	51,64	55,05	58,24	58,6	53,6	53,1	53,8	53,3
СКО аппроксимирующей кривой от исходной	32,600	16,363	9,882	5,500	3,243	1,815	0,99	0,68	0,50	0,41	0,37
СКО порогового тока от среднего значения	-	-	26,55	14,67	8,76	4,79	2,40	1,36	0,77	0,24	0,13
		Степенная функция $P_{power}(I)$									
I_{th} , нА	133,58	67,84	77,88	76,85	79,57	83,23	83,6	77,9	77,2	78	77,6
СКО аппроксимирующей кривой от исходной	32,602	16,288	9,874	5,500	3,246	1,813	0,99	0,68	0,52	0,43	0,38
СКО порогового тока от среднего значения	-	-	27,57	18,30	15,80	11,08	6,45	2,48	1,22	0,37	0,3

Из таблицы видно, что СКО аппроксимирующих функций $P_{ABC}(I)$ и $P_{Power}(I)$ от экспериментальной ВтАХ практически одинаковы, но СКО порогового тока при стократном повторении расчета при разных уровнях шума заметно различаются: погрешность определения порогового тока при аппроксимации ВтАХ функцией $P_{power}(I)$ выше, чем функцией $P_{ABC}(I)$.

Несмотря на то, что при аппроксимации ВтАХ функциями $P_{ABC}(I)$ и $P_{Power}(I)$ получаются близкие значения СКО от измеренной ВтАХ, абсолютные значения порогового тока существенно отличаются.

Кроме случайной погрешности на результат определения порогового тока светодиода влияет систематическая составляющая погрешности, вызванная смещением нуля ОУ и смещением передаточной характеристики аналого-цифрового преобразователя(АЦП). Чтобы определить поправку, необходимую для внесения в результат измерения ВтАХ, необходимо измерить суммарное смещение нуля на выходе фотоприемного устройства, оценить смещение нуля АЦП путем последовательного увеличения сигнала на его входе и фиксации момента, когда появляется первый бит данных. Полученное значение поправки вычитается из результатов измерения ВтАХ СИД при положительном смещении и прибавляется при отрицательном.

Предложенные принцип и способ определения порогового тока являются объективными, и результат измерения порогового тока не зависит от характеристик фотоприемных устройств. Для подтверждения независимости измеренных значений порогового тока от чувствительности фотодиода, были проведены измерения порогового

тока одного и того же СИД с двумя разными типами фотодиодов: ФД256 и SFH203 (рис. 4). При использовании фотодиода ФД256 в фотоприемном устройстве результат измерения порогового тока маломощного зеленого СИД фирмы Cree составил 105 нА, а при использовании фотодиода SFH203 – 103 нА.

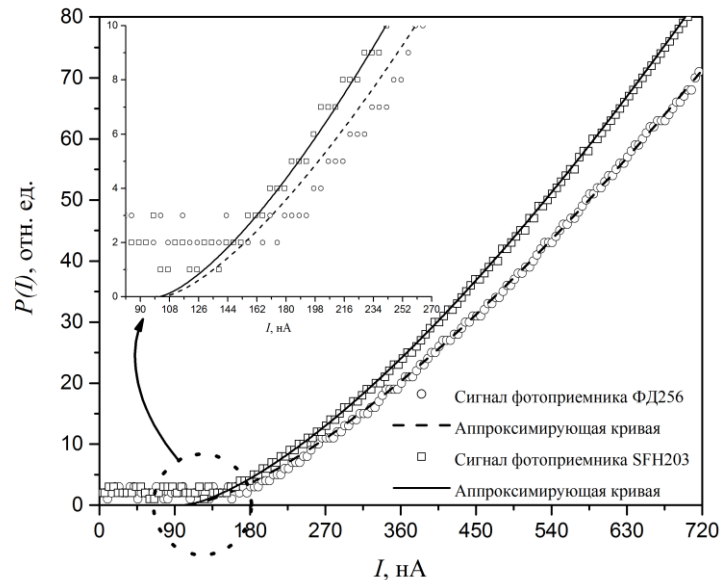


Рисунок 4 – Токовые зависимости мощности излучения светодиода, при регистрации сигнала двумя разными фотодиодами

Для подтверждения независимости значения порогового тока от характеристик ОУ в составе трансимпедансного усилителя фотоприемного устройства были проведены измерения порогового тока одного и того же СИД с двумя разными типами ОУ: ОРА192 и ОРА657 (рис. 5). При использовании ОУ ОРА192 результат измерения порогового тока маломощного синего СИД Nichia составил 141 нА, а при использовании ОУ ОРА657 – 148 нА. Установлено, что результат определения порогового тока при измерении ВтАХ фотоприемными устройствами различной чувствительности находится в пределах 5 %.

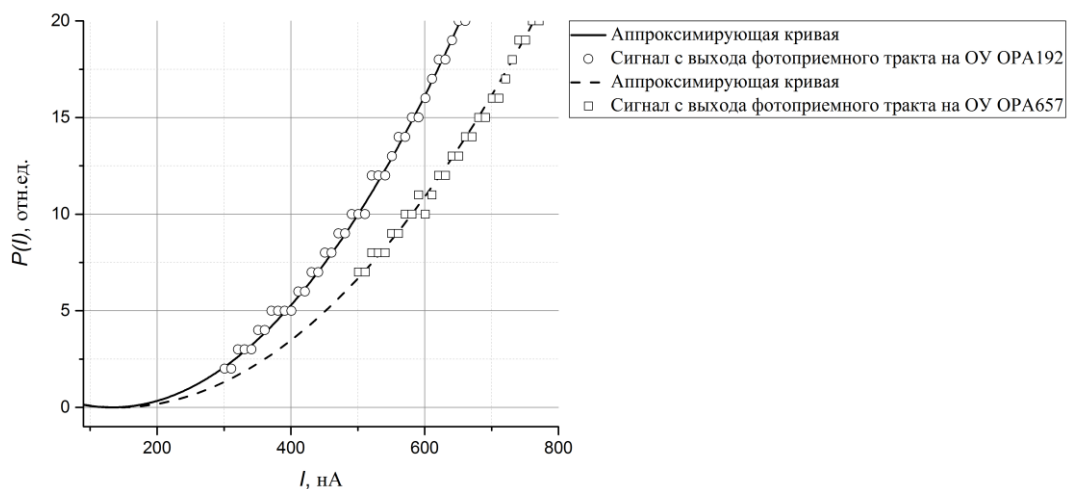


Рисунок 5 – Токовые зависимости мощности излучения светодиода, при регистрации сигнала трансимпедансными усилителями с разными ОУ с учетом влияния смещения ОУ и смещения нуля АЦП

Оценка случайной составляющей полной погрешности установки для измерения порогового тока СИД осуществлена путем десятикратного определения порогового тока одного и того же типа светодиода. Результаты измерения представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты измерения порогового тока синего светодиода фирмы Cree

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I_{th} , нА	71.7	68.2	68.5	67.7	68.8	67.7	68.4	67.8	69.2	68.1

Математическое ожидание и стандартное отклонение рассчитаны по стандартным формулам: $\tilde{I}_{th} = 68,61$, $\sigma_{I_{th}} = 0,3604$. При доверительной вероятности $p = 0,95$ и числе измерений $n = 10$ доверительная граница случайной погрешности составляет 1.2 %.

В третьей главе проведен анализ погрешностей, возникающих при измерении граничной частоты электролюминесценции СИД обусловленных нелинейностью ВтАХ и наличием аддитивного шума в измерительной цепи фотоприемного устройства. Показано, что из-за нелинейности ВтАХ СИД и при наличии аддитивных шумов в измерительной цепи существует значение амплитуды тестового тока, при котором суммарная относительная погрешность измерения принимает минимальное значение.

Путем разложения ВтАХ $P(I)$ СИД в окрестности рабочей точки I_0 в ряд Тейлора $P(I) = P_0 + a\Delta I + b\Delta I^2 + \dots$, где P_0 – значение мощности в рабочей точке I_0 : $P(I_0) = I_0$, а коэффициенты a и b соответственно равны: $a = \left. \frac{dP(I)}{dI} \right|_{I_0}$ и $b = \frac{1}{2} \left. \frac{d^2 P(I)}{dI^2} \right|_{I_0}$, и

последующего математического преобразования получено выражение для оценки относительной погрешности измерения граничной частоты СИД без учета шума в измерительной цепи:

$$\varepsilon = \frac{0,7q^2}{2(2qI_0 + 1)^2 (\sqrt{2qI_0 + 1} - 1)^2} I_m^2. \quad (4)$$

Графики зависимостей погрешности измерения граничной частоты из-за нелинейности ВтАХ при разной степени ее нелинейности q показаны на рис. 6.

Сигнал на выходе фотоприемного устройства представляет собой сумму сигнала, пропорционального мощности излучения СИД, и шума $U_{ш}$:

$$U_{\Phi\P}(\omega) = S \sqrt{\frac{a^2 I_m^2}{1 + \omega^2 \tau^2} + \frac{b^2 I_m^4}{4(1 + 4\omega^2 \tau^2)}} + U_{ш}, \quad (5)$$

где S [В/Вт] – коэффициент преобразования мощности излучения СИД в выходное напряжение фотоприемника, который определяется чувствительностью фотодиода, коэффициентом усиления, диаграммами направленности СИД и фотодиода.

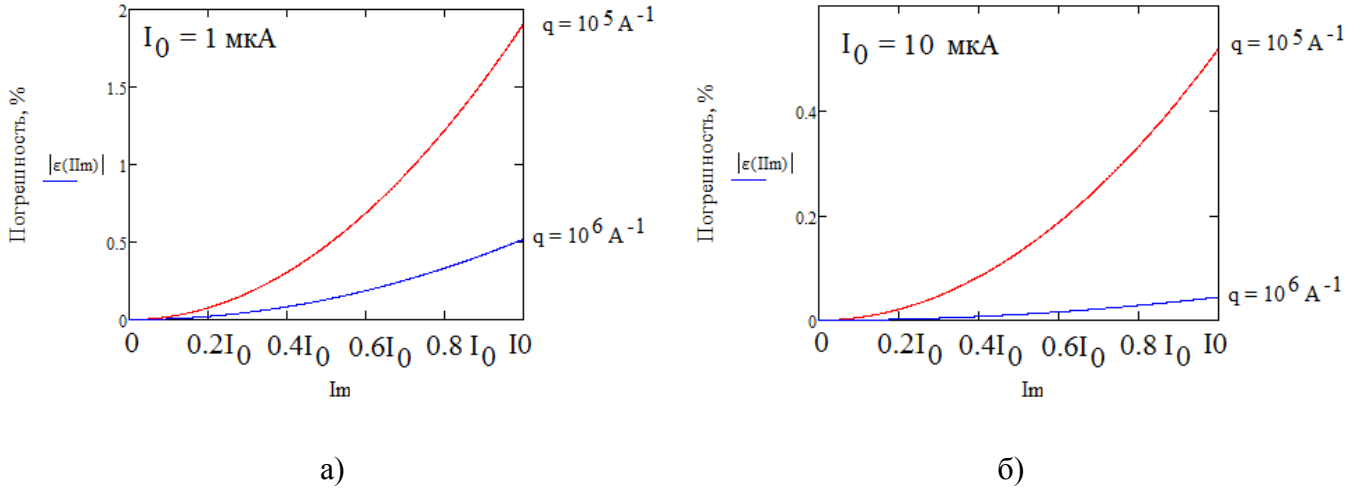


Рисунок 6 – Погрешность измерений граничной частоты СИД от амплитуды тока при токе 1 мкА (а) и 10 мкА (б), обусловленная нелинейностью ватт-амперной характеристики светодиода

С учетом нелинейности и шума фотоприемника условие определения граничной частоты дает погрешность, для оценки которой надо решить уравнение

$$S \sqrt{\frac{a^2 I_m^2}{1 + \omega^2 \tau^2} + \frac{b^2 I_m^4}{4(1 + 4\omega^2 \tau^2)}} + U_{III} = S \frac{a I_m}{2}. \quad (6)$$

В результате решения уравнения, получено выражение для оценки относительной погрешности измерений граничной частоты с учетом шума измерительных цепей:

$$\varepsilon = \left(\frac{x}{3} - 1 \right) 100\%, \quad (7)$$

где

$$x = \frac{- \left[5 \left(\frac{1}{2} - \frac{U_{III}}{S a I_m} \right)^2 - \frac{b^2 I_m^2}{4 a^2} - 4 \right] + \sqrt{\left[5 \left(\frac{1}{2} - \frac{U_{III}}{S a I_m} \right)^2 - \frac{b^2 I_m^2}{4 a^2} - 4 \right]^2 - 16 \left(\frac{1}{2} - \frac{U_{III}}{S a I_m} \right)^2 \cdot \left(\left(\frac{1}{2} - \frac{U_{III}}{S a I_m} \right)^2 - \frac{b^2 I_m^2}{4 a^2} - 1 \right)}}{8 \left(\frac{1}{2} - \frac{U_{III}}{S a I_m} \right)^2}.$$

Рассчитано значение U_{III} на выходе фотоприемного устройства, где для регистрации оптического излучения использовался фотодиод SFH203. Фототок преобразовался в напряжение трансимпедансным усилителем на основе широкополосного ОУ ОРА656.

Из теории шумящих четырехполюсников следует, что исследуемый усилитель может быть представлен нешумящим усилителем с вынесенными двумя генераторами шума: напряжения и тока. Последовательно со входом нешумящего усилителя включен генератор эквивалентного шумового напряжения e , а параллельно входу – генератор эквивалентного шумового тока i (рис. 7). Для упрощения дальнейших расчетов было принято, что источники шумового тока и шумового напряжения некоррелированы. В усилителях с обратной связью в дополнение к шумам активного элемента присутствуют шумы, создаваемые элементами цепей обратной связи. В случае трансимпедансного усилителя, это тепловой шум резистора обратной связи R_{oc} .

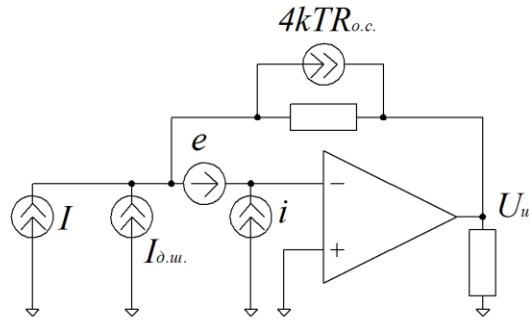


Рисунок 7 – Шумовая эквивалентная схема трансимпедансного усилителя

В этом представлении среднее квадратическое значение шума выходного напряжения для приведенной выше схемы трансимпедансного усилителя в полосе частот Δf равно:

$$U_{ш} = \sqrt{e^2 + 4kTR_{oc}\Delta f + (iR_{oc})^2}. \quad (8)$$

где i – среднее значение тока, протекающего через фотодиод.

Для выбранных элементов $U_{ш} = 43$ мкВ при $R_{oc} = 10$ кОм.

На основе выражения (7) были построены зависимости погрешности измерений частоты f_{3dB} СИД от амплитуды переменного тока при среднем токе $I_0 = 1$ мкА (а) и $I_0 = 10$ мкА (б), обусловленная нелинейностью ВТАХ СИД и шумом фотоприемника при $U_{ш} = 43$ мкВ и $S = 20$ В/Вт (рис. 8). Представленные на рис. 8 зависимости имеют минимальные значения при определенных значениях амплитуды тока.

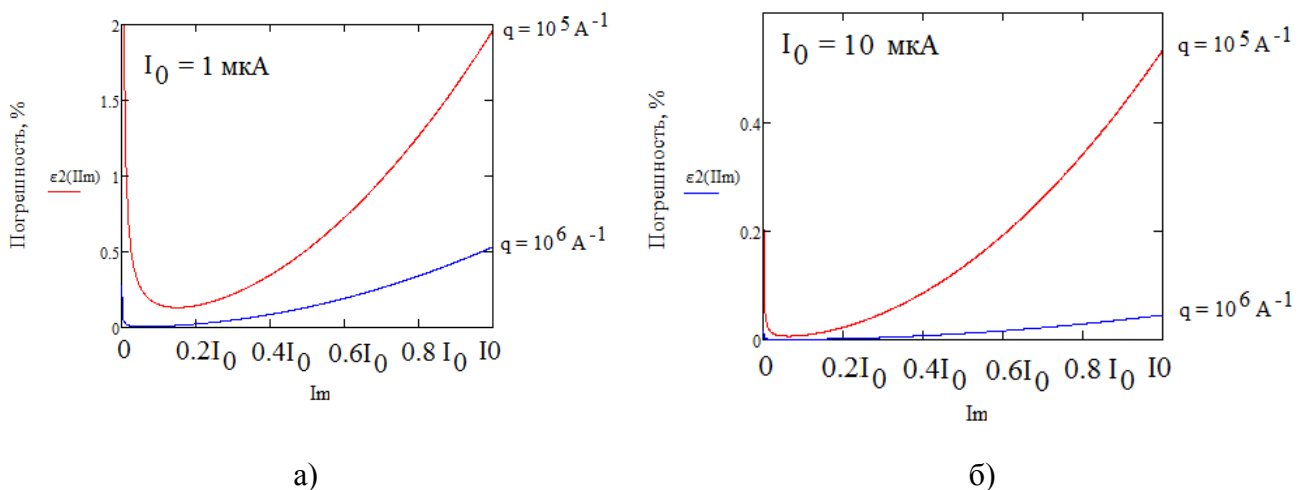


Рисунок 8 – Погрешность измерений граничной частоты СИД от амплитуды тока при токе 1 мкА (а) и 10 мкА (б), обусловленная нелинейностью ватт-амперной характеристики светодиода и шумом фотоприемника

В четвертой главе исследована возможность использования порогового тока и граничной частоты электролюминесценции для оценки качества и надежности СИД, представлены результаты исследования связи порогового тока и граничной частоты с другими характеристиками СИД. Проведена оценка степени дефектности СГС зеленых InGaN/GaN СИД по пороговому току.

Для исследований связи порогового тока с качеством СГС была взята выборка из 100 штук СИД типа ARL-5215PGC производства фирмы Arlight с InGaN/GaN гетероструктурой зеленого свечения. Измерения на разработанной установке показали, что значения порогового тока I_{th} СИД при комнатной температуре $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ лежат в пределах 21...607 нА. Гистограмма выборочного распределения СИД по уровню порогового тока I_{th} приведена на рисунке 9. Как показывают расчеты, среднее выборочное значение порогового тока равно 110 нА, а СКО – 113 нА. Близость значений этих параметров выборочных распределений характерна для экспоненциального закона распределения. Основная часть (72 штуки) СИД попадает в первый интервал гистограммы распределения с пороговым током в диапазоне 21...90 нА (выделен на рис. 9 серым фоном).

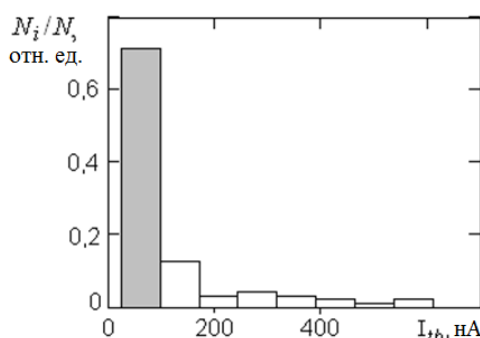


Рисунок 9 – Гистограмма распределения выборки светодиодов ARL-5215PGC из $N = 100$ штук по величине порогового тока

Установлено, что СИД с малым пороговым током (21...50 нА) имеют более равномерный профиль распределения концентрации носителей заряда в СГС, чем СИД с большим пороговым током (200...607 нА). Коэффициент корреляции между значениями порогового тока I_{th} и градиента концентрации носителей заряда $\Delta n/\Delta w$ составляет 0,7. То есть СИД с более равномерным профилем распределения концентрации носителей заряда в СГС имеют меньше дефектов в активной области и, соответственно, характеризуются малыми значениями порогового тока.

Поскольку дефекты СГС должны проявляться в аномалиях токовой зависимости внешней квантовой эффективности были измерены зависимости внешней квантовой эффективности от плотности тока $\eta(j)$ для трех СИД ARL-5215PGC с различными значениями порогового тока (рис. 10).

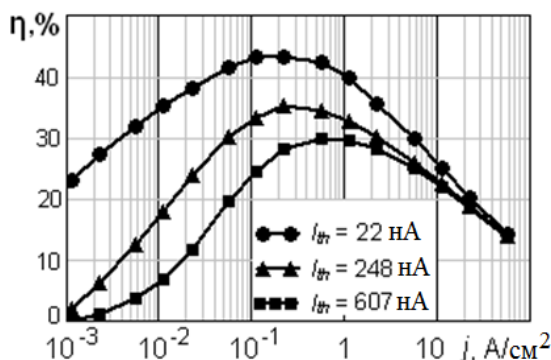


Рисунок 10 – Зависимость внешней квантовой эффективности от плотности тока для трех светодиодов ARL-5215PGC с различными значениями порогового тока

Как видно из рис. 10, с увеличением значения порогового тока внешняя квантовая эффективность СИД заметно уменьшается: у СИД с пороговым током $I_{th} = 22$ нА $\eta(j)$ достигает максимум при плотности тока $0,1$ А/см², а у СИД с $I_{th} = 607$ нА – при $0,6$ А/см². Статистический расчет показал, что наибольшего значения коэффициент корреляции между уровнем порогового тока и значениями внешней квантовой эффективности СИД достигает при малых плотностях тока, на участке роста внешней квантовой эффективности, где наиболее заметно проявляются дефекты структуры.

Установлено, что светодиоды с малым пороговым током имеют более равномерный профиль распределения концентрации носителей заряда в СГС, чем СИД с большим пороговым током. Следовательно, СИД с более равномерным профилем имеют меньшую концентрацию дефектов в активной области и характеризуются малыми значениями порогового тока.

Установлена сильная корреляционная связь значений порогового тока с уровнем НЧ-шума, что подтверждает возможность использования порогового тока как диагностического параметра. Корреляционная связь между пороговым током и уровнем НЧ-шума, измеренным в режиме малых токов, значительно больше, чем в режиме больших токов, поскольку при малых токах генерационно-рекомбинационные процессы на дефектных уровнях сильнее влияют на флуктуации тока.

Показана возможность измерения предложенным способом порогового тока отдельных кристаллов светодиодных матриц с последовательным включением кристаллов в матрице. Измерение порогового тока отдельных кристаллов матрицы позволяет выявлять наиболее дефектные кристаллы в матрице, что не возможно путем измерения интегральных параметров, таких как падение напряжения при заданном токе, световой поток, цветовая температура, тепловое сопротивление.

Результаты измерений пороговых токов кристаллов матриц показали, что их значения существенно различаются. В таблице 3 приведены оценки средних значений $\overline{I_{th}}$, СКО σ_{th} , коэффициентов вариации $v = (\sigma_{th} / \overline{I_{th}}) \times 100\%$.

Таблица 3 – Оценки выборочных значений пороговых токов кристаллов светодиодных матриц

№ матрицы	D1	D2	D5	D6	D14
$\overline{I_{th}}$, нА	12	42	38	73	24
σ_{th} , нА	4,8	1,1	2,2	9,4	1,4
v , %	39,2	2,6	5,8	12,9	5,8

Для InGaN/GaN СГС с множественными квантовыми ямами характерно существенно неоднородное распределение различного рода дефектов по объему активной области СГС, что в свою очередь является причиной неоднородного распределения плотности тока и температуры в кристалле прибора, ускорения процессов дефектообразования в областях с повышенной плотностью тока.

Показано, что разработанный способ определения порогового тока позволяет провести измерение профиля распределения порогового тока по площади кристаллов СИД. Полученные профили могут быть использованы для качественной оценки СИД. Проведены измерения порогового тока в локальных областях кристалла двух типов светодиодов (рис.11).

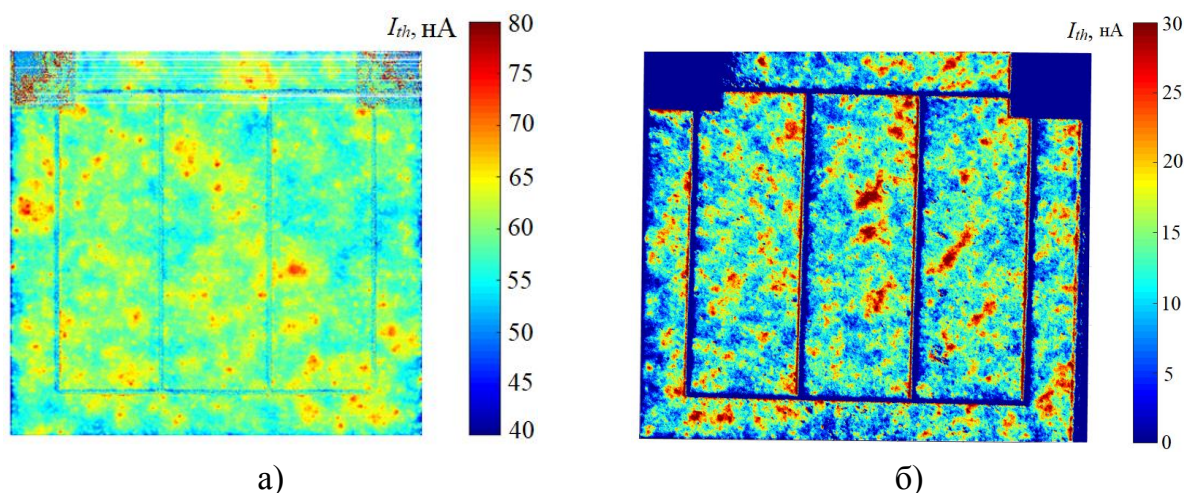


Рисунок 11 – Профили распределения порогового тока I_{th} по кристаллу зеленого светодиода (а) и синего светодиода (б)

Распределение тока I_{th} по кристаллу исследованных СИД неравномерное. Среднее значение порогового тока зеленого СИД составляет 58 нА, а в локальных областях ток I_{th} достигает 80 нА. Среднее значение порогового тока синего СИД составляет 11 нА, тогда как в локальных областях ток I_{th} достигает 30 нА. Установлено, что распределение порогового тока по площади кристалла зеленого СИД более однородное, чем распределение по площади кристалла синего СИД, у которого значительную часть площади составляют области со значениями порогового тока, существенно превосходящего среднее значение.

В пятой главе представлены результаты исследовательских испытаний СИД и сравнения эффективности отбраковки потенциально ненадежных светодиодов по пороговому току и прямому падению напряжения.

Для установления связи между значениями порогового тока и скоростью спада мощности излучения СИД при работе были проведены их испытания при комнатной температуре на постоянном токе 25 мА в течение 500 часов. Результаты испытаний показали, что спад мощности излучения СИД, находящихся в первом интервале гистограммы распределения (рис. 9), составляет около 5% относительно исходного значения, а спад мощности излучения СИД, не входящих в данный интервал, в среднем достигает 30%. Коэффициент корреляции между исходными значениями порогового тока СИД и значениями относительного снижения мощности их излучения через 500 часов испытаний составляет 0,9.

Исследованы изменения порогового тока и граничной частоты СИД при испытаниях под действием тока. Для этого проведены испытания двух выборок коммерческих InGaN синих и зеленых СИД на постоянном токе плотностью 25 А/см² при комнатной температуре в течение 5000 часов. Установлено, что темп спада светового потока излучения СИД двух типов существенно различается: за время испытаний снижение светового потока относительно начального значения составило в среднем по выборке 36 % для синих и 11 % для зеленых. Так же установлено, что спад светового потока и внешней квантовой эффективности сопровождается увеличением порогового тока начала свечения на 99 % у синих и на 26 % у зеленых СИД соответственно (рис.12).

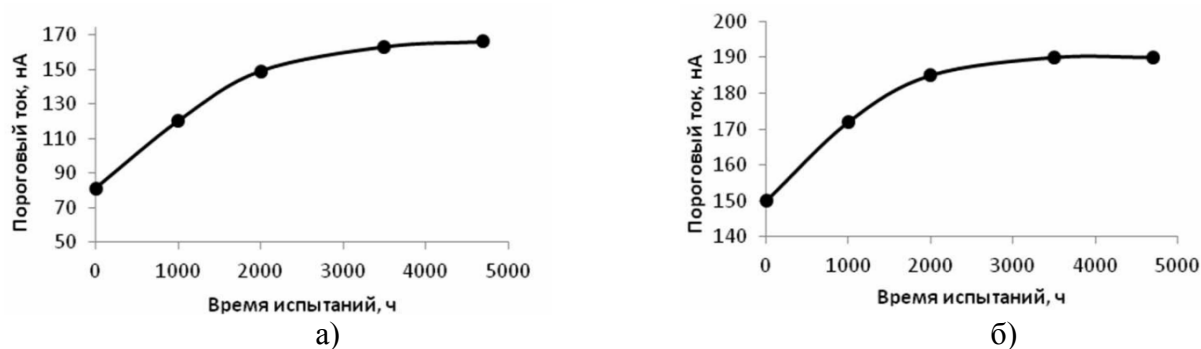


Рисунок 12 – Изменения порогового тока начала свечения синих (а) и зеленых (б) светодиодов в процессе испытаний под действием постоянного тока плотностью 25 A/cm^2 при температуре окружающей среды 25°C

В процессе испытаний произошло уменьшение граничной частоты модуляции электролюминесценции на 4% у синих и на 2% у зеленых СИД (рис. 13).

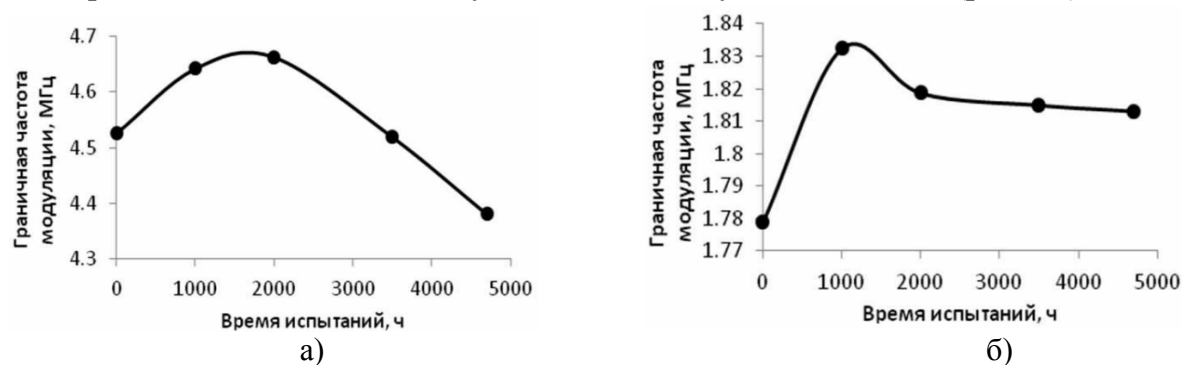


Рисунок 13 – Изменение граничной частоты модуляции электролюминесценции синих (а) и зеленых (б) светодиодов в процессе испытаний под действием постоянного тока плотностью 25 A/cm^2 при температуре окружающей среды 25°C

Проведено сравнение эффективности отбраковки потенциально ненадежных СИД по пороговому току и прямому падению напряжения. Исследования проводились на выборке в количестве 50 штук синих InGaN/GaN СИД отечественного производства. Испытания указанной выборки СИД проводились при комнатной температуре на постоянном токе плотностью 25 A/cm^2 в течение 7000 часов.

Отбраковка по пороговому току проводилась по среднему значению порогового тока по исследованной выборке – $20,9 \text{ nA}$: отбраковке подлежали СИД, у которых пороговый ток превышал среднее значение.

По падению напряжения при токе 100 nA потенциально ненадежными считались СИД, у которых напряжение превышало $1,882 \text{ В}$; по падению напряжения, измеренному при токе 1 mA – СИД, у которых напряжение было меньше $2,583 \text{ В}$, а по падению напряжения, измеренному при токе 20 mA , к потенциально ненадежным относились СИД, у которых напряжение было меньше $2,917 \text{ В}$. Результаты разделения СИД по надежности по исследуемым информативным параметрам приведены в таблице 4.

Из таблицы видно, что эффективность отбраковки СИД по пороговому току выше, а вероятность ошибок второго рода существенно меньше, чем при отбраковке по падению напряжения, тогда как значение вероятности ошибок первого рода примерно одинаковы.

Таблица 4 – Оценка результатов разделения светодиодов по надежности

Информативный параметр	Кол-во отбракованных светодиодов	$K_{эфф}$	Кол-во ложно отбракованных годных светодиодов (P_1)	Кол-во неотбракованных ненадежных светодиодов (P_2)
По пороговому току	19	1,93	2 (0,07)	6 (0,26)
По падению напряжения при токе 20 мА	15	1,88	2 (0,07)	10 (0,45)
По падению напряжения при токе 1 мА	15	1,74	3 (0,11)	11 (0,48)
По падению напряжения при токе 100 нА	13	1,88	1 (0,05)	11 (0,48)

В **заклучении** сформулированы основные научные и практические результаты диссертационной работы:

1. Разработан способ определения порогового тока СИД по результатам измерения и аппроксимации его ВтАХ независимо от чувствительности фотоприемного устройства, состоящий в задании прецизионным источником нарастающего тока через СИД, регистрации сигнала, пропорционального мощности излучения СИД, высокочувствительным фотоприемником на основе фотодиода и маломушьящего трансимпедансного усилителя и определении значения порогового тока путем аппроксимации ВтАХ функцией вида $P_{ABC}(I) = \frac{m}{2} \left(\sqrt{1 + 2q(I - I_{th})} - 1 \right)^2$.

2. Предложенный способ позволяет измерять пороговый ток отдельных кристаллов светодиодных матриц, а также профиль распределения порогового тока по площади кристаллов светодиодов, что позволяет выявлять кристаллы матриц и локальные области кристаллов с повышенной концентрацией дефектов.

3. Установлено, аппроксимация ВтАХ функцией вида $P_{ABC}(I) = \frac{m}{2} \left(\sqrt{1 + 2q(I - I_{th})} - 1 \right)^2$ дает меньшую погрешность определения порогового тока, чем аппроксимация общепринятой функцией вида $P_{power}(I) = a(|I - I_{th}|)^b$. При отношении сигнал/шум 35 дБ аппроксимация функцией P_{ABC} позволяет определять пороговый ток с погрешностью в 2,7 раза меньше, чем аппроксимация функцией P_{Power} .

4. Разработана автоматизированная установка для измерения порогового тока СИД предложенным способом. Основные технические характеристики установки: диапазоны изменения тока через СИД 0 – 60 мкА, 0 – 300 мкА, 0 – 3 мА; минимальный шаг изменения тока 1 нА для диапазона тока 0 – 60 мкА; скорость нарастания тока СИД зависит от шага изменения тока и находится в диапазоне 3 мкА/с – 10 А/с; погрешность установки тока $\pm 0,5$ % для диапазона 0 – 60 мкА.

5. Впервые рассмотрены ограничения на амплитуду переменного сигнала при измерении граничной частоты электролюминесценции СИД. Показано, что погрешность измерения переменной составляющей мощности излучения СИД в диапазоне малых токов (до 100 мкА) обусловлена нелинейностью ВТАХ СИД и влиянием шумов измерительных цепей. Показано, что существует значение амплитуды переменного тока, при которой суммарная погрешность измерений граничной частоты электролюминесценции СИД принимает минимальное значение. Получено выражение для определения значения амплитуды гармонического сигнала, при котором суммарная относительная погрешность измерения граничной частоты электролюминесценции СИД принимает минимальное значение.

6. Установлена связь порогового тока с дефектностью структуры СИД. Показано, что при испытаниях в режиме постоянного тока СИД с большими значениями порогового тока деградируют быстрее, чем СИД с малыми значениями порогового тока. Коэффициент корреляции между значениями порогового тока СИД и скоростью спада мощности составляет 0,9.

7. Показано, что пороговый ток и падение напряжения при заданном токе могут быть использованы в качестве информативных параметров для отбраковки потенциально ненадежных СИД, склонных к ускоренной деградации. При этом эффективность отбраковки СИД по пороговому току заметно выше, а вероятность ошибок второго рода в 1,7 раза меньше, чем при отбраковке по падению напряжения, тогда как значение вероятности ошибок первого рода примерно одинаковы.

Список опубликованных работ по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России

1. Сергеев, В. А. Оценка качества гетеропереходных светодиодов по уровню порогового тока / В. А. Сергеев, **О. А. Радаев**, И. В. Фролов, А. А. Черторийский // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2017. – Т. 22, №1. – С. 92–95.

2. Сергеев, В. А. Закономерности изменения внешней квантовой эффективности InGaN/GaN зеленых светодиодов в процессе ускоренных испытаний / В. А. Сергеев, И. В. Фролов, **О. А. Радаев**, А. А. Широков // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2017. – Т. 22, №3. – С. 220–230.

3. Сергеев, В. А. Измеритель внутренней квантовой эффективности светодиода / В. А. Сергеев, **О. А. Радаев**, И. В. Фролов // Приборы и техника эксперимента. – 2023. – №6. – С. 103–110.

4. **Радаев, О.А.** Сравнение эффективности отбраковки потенциально ненадежных светодиодов по пороговому току и прямому падению напряжения / О.А. Радаев, И.В. Фролов, В.А. Сергеев, С.А. Зайцев // Контроль. Диагностика. – 2025. – Т. 28, № 7. – С. 61–66.

Публикации в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science

5. Frolov, I. V. Measurement of the threshold current in the local areas of the LED chip / I. V. Frolov, **O. A. Radaev**, V. A. Sergeev // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. – 2023. – V. 16 (3.1). – P. 330–334.

6. Sergeev, V. A. Measurement of the LED electroluminescence 3dB frequency at low currents / V. A. Sergeev, I. V. Frolov, **O. A. Radaev** // 2023 IX International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). – Samara, 2023. – P. 1–5.

7. Frolov I. V. Changing of the dynamic characteristics of the spectral components of the InGaN-based LEDs spectrum during current tests / I. V. Frolov, **O. A. Radaev**, V. A. Sergeev // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – V. 1695. – P. 012076.

8. Frolov, I. V. Installation for Measuring of the Slope of the P-I Characteristic of the LED in the Range of the Electroluminescence Start Currents / I. V. Frolov, **O. A. Radaev**, V. A. Sergeev // 2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering : Materials Of The International Scientific And Technical Conference. – Saratov : Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 2020. – P. 262–264.

9. Sergeev, V. A. Measurement of the Dynamic Characteristics of Separate Spectral Bands of the LEDs Electroluminescence Spectra / V. A. Sergeev, I. V. Frolov, **O. A. Radaev** // 2020 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). – Moscow, 2020. – P. 1–5.

10. Frolov, I. V. Development of the Method of Determining of InGaN Based LEDs Tended to Early Degradation on the Results of Current Tests / I. V. Frolov, **O. A. Radaev**, V. A. Sergeev // 2018 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering : Materials Of The International Scientific And Technical Conference. – Saratov : Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 2018. – P. 212–215.

11. **Radaev, O. A.** Hardware-Software Complex for the Investigation of the Dynamic Characteristics of Separate Spectral Components of the Emission Spectrum of LEDs / O. A. Radaev, V. A. Sergeev, I. V. Frolov // Measurement Techniques. – 2019. – V. 62, №8. – P. 708–713.

12. Sergeev, V. A. The Relationship between the Defectness of Emitting Nanoheterostructures of Green InGaN/GaN LEDs and Their Threshold Current Values / V. A. Sergeev, I. V. Frolov, **O. A. Radaev** // Technical Physics Letters. – 2017. – Vol. 43, No. 2. – P. 224–226.

13. Frolov, I. V. Degradation of green InGaN-based LEDs during the tests at the constant current / I. V. Frolov, **O. A. Radaev**, V. A. Sergeev // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – V. 917. – P. 052017.

14. **Radaev O.A.**, Sergeev V.A., Frolov I.V. Evaluation of the quality of green InGaN LEDs by values of the threshold current // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – V. 741. – P. 012087.

15. Sergeev, V. A. The Relationship between the Defectness of Emitting Nanoheterostructures of Green InGaN/GaN LEDs and Their Threshold Current Values / V. A. Sergeev, I. V. Frolov, **O. A. Radaev** // Technical Physics Letters. – 2017. – Vol. 43, No. 2. – P. 224–226.

Патенты на изобретения

16. Пат. 2807500 РФ, МПК H01L 33/04, H05B 45/10. Способ измерения порогового тока светодиода / В. А. Сергеев, **O. A. Радаев**, И. В. Фролов; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук. – № 2023112857; заявл. 17.05.2023; опубл. 15.11.2023. Бюл. №32.

17. Пат. 2772930 РФ, МПК G01R 31/26. Способ измерения теплового сопротивления переход-корпус светодиода / Сергеев В.А., Фролов И.В., **Радаев O.A.**, Зайцев С.А., Козликова И.С.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук. – № 2021123790; заявл. 06.08.2021; опубл. 27.05.2022. Бюл. № 15.

18. Пат. 2676246 РФ, МПК G01J 5/60, G01R 31/265. Способ измерения температуры активной области светодиода / Сергеев В.А., **Радаев О.А.**, Козликова И.С.; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Ульяновский государственный технический университет. - № 2017139686; заявл. 14.11.2017; опубл. 26.12.2018. Бюл. №36.

Публикации в прочих изданиях

19. **Радаев, О. А.** Сравнительный анализ параметров выборочных распределений светодиодов по пороговому току и прямому падению напряжения / О. А. Радаев // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем : сборник научных трудов. Шестнадцатый выпуск. – Ульяновск : УлГТУ, 2025. – С. 178–182.

20. **Радаев, О. А.** Сравнение способов отбраковки по пороговому току и падению напряжения / О. А. Радаев // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации : Материалы XI международной заочной научно-технической конференции. – Тольятти : ПВГУС, 2025. – С. 470–477.

21. Сергеев, В. А. Контроль качества светодиодных СОВ матриц по пороговому току / В. А. Сергеев, И. В. Фролов, С. А. Зайцев, **О. А. Радаев** // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2023. – № 11. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/nov23/6/abstract.html>

22. **Радаев, О. А.** Измеритель порогового тока светодиодов / О. А. Радаев, В. А. Сергеев, И. В. Фролов // Физические основы приборостроения. – 2023. – Т. 12, № 3(49). – С. 23–27.

23. Фролов, И. В. О связи локальных параметров электролюминесценции зеленых InGaN светодиодов с параметрами вольтамперных и шумовых характеристик в диапазоне токов начала свечения / И. В. Фролов, **О. А. Радаев**, А. А. Гавриков, В. А. Гавриков // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2019. – № 10. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/oct19/5/text.pdf>

24. Сергеев, В. А. Связь уровня фототока светоизлучающих InGaN/GaN гетероструктур с уровнем НЧ-шума и порогового тока / В. А. Сергеев, И. В. Фролов, **О. А. Радаев** // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2019. – Т. 24, №1. – С. 92–96.

25. Фролов, И. В. Динамические характеристики и квантовая эффективность отдельных спектральных составляющих спектра излучения InGaN светодиодов / И. В. Фролов, **О. А. Радаев**, В. А. Сергеев // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2018. – № 9. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/sep18/7/text.pdf>

26. **Радаев, О. А.** Измерение граничной частоты электролюминесценции светодиодов при малых токах / О. А. Радаев, И. В. Фролов, В. А. Сергеев // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2023): сборник трудов по материалам IX Международной конференции и молодежной школы. – Самара: Издательство Самарского университета, 2023. Т.1 – С. 011352.

27. Сергеев, В. А. Измеритель порогового тока светодиодов / В. А. Сергеев, И. В. Фролов, **О. А. Радаев** // Труды Международной научно-технической конференции «Современные технологии научного приборостроения и информационно-измерительных систем». – М. : НТЦ УП РАН, 2023. – С. 120–124.

28. Frolov, I. V. Measurement of threshold current in local areas of the LED chip / I. V. Frolov, **O. A. Radaev**, V. A. Sergeev // Book of Abstracts. Book of Abstracts of 10rd International School and Conference «Saint Petersburg OPEN 2023». St Petersburg: HSE University, 2023. – P. 1–2

29. **Радаев, О.А.** Оценка погрешностей измерений граничной частоты излучения светодиода при малых токах / О. А. Радаев, И. В. Фролов, В. А. Сергеев // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники : материалы 25-й Всероссийской молодежной научной конференции. – Ульяновск : УлГТУ, 2022. – С. 179–180.

30. Фролов, И. В. Исследование изменений пороговых и граничных параметров электролюминесценции светодиодов при испытаниях под действием тока / И. В. Фролов, **О. А. Радаев**, В. А. Сергеев // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – Пенза: ПГУ, 2022. – Т. 2. – С. 55–57.

31. Фролов, И. В. Диагностический контроль качества светодиодов по динамическим параметрам электролюминесценции / И. В. Фролов, В. А. Сергеев, **О. А. Радаев** // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – Пенза: ПГУ, 2020. – Т. 2. – С. 142–144.

32. **Радаев, О. А.** Исследование частотных характеристик оптического излучения светодиодов на основе InGaN/GaN-гетероструктур / О. А. Радаев, В. А. Сергеев, И. В. Фролов // Материалы Международной научно-технической конференции INTERMATIC-2016. – Москва: МИРЭА, 2016. – Т. 4. – С. 161–164.

33. **Radaev, O. A.** Evaluation of the quality of green InGaN LEDs by values of the threshold current / O. A. Radaev, V. A. Sergeev, I. V. Frolov // Book of Abstracts of 3rd International School and Conference «Saint Petersburg OPEN 2016». – St. Petersburg: HSE University, 2016. – P. 269–270.

34. Сергеев, В. А. Связь между значением порогового тока и внешней квантовой эффективностью зеленых InGaN светодиодов / В. А. Сергеев, И. В. Фролов, А. А. Широков, **О. А. Радаев** // «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» : тез. докл. X Всерос. конф. молодых ученых. – Саратов : Изд-во «Техно-Декор». – 2015. – С. 178–179.

35. Сергеев, В. А. Диагностика полупроводниковых источников излучения: учебное пособие для вузов / В. А. Сергеев, И. В. Фролов, **О. А. Радаев**. – Ульяновск : УлГТУ, 2021 – 95 с.

Радаев Олег Александрович

**СПОСОБЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ПОРОГОВЫХ И ПРЕДЕЛЬНЫХ
ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ СВЕТОДИОДОВ**

Подписано в печать «22 » октября 2025 г.

Усл. печ. л. 1,40. Тираж 100 экз. Заказ 525

ИПК «Венец» УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, Северный Венец, 32