

На правах рукописи



Андреева Мария Владимировна

**СВЕТОДИОДНЫЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА НА ОСНОВЕ КРИ-
СТАЛЛОВ GaN/InGaN С УЛУЧШЕННЫМ ПРОСТРАН-
СТВЕННЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ КОРРЕЛИРОВАННОЙ
ЦВЕТОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ**

2.2.6 – Оптические и оптико-электронные приборы
и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2026

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

Научный руководитель – **Туев Василий Иванович**,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой радиоэлектронных
технологий и экологического мониторинга
ТУСУР.

Официальные оппоненты – **Полисадова Елена Федоровна**,
доктор физико-математических наук,
профессор отделения материаловедения ИШНПТ
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»;

Туркин Андрей Николаевич,
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры оптики, спектроскопии
и физики наносистем ФГБОУ ВО
«Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова».

Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарёва».

Защита состоится 1 декабря 2026 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, по адресу: 634050, г. Томск, ул. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ТУСУРа
<https://postgraduate.tusur.ru/urls/8hmpo5lw>

Автореферат разослан ____ октября 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.415.01
доктор технических наук, доцент



Суровцев Р.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Свет является ключевым фактором в жизни человека. Он позволяет видеть, оценивать форму и цвет предметов, которые окружают нас в повседневной жизни.

В современном мире, характеризующемся интенсивной урбанизацией и значительным количеством времени, которое человек проводит в интерьерах, ключевое значение приобретает задача формирования комфортной световой среды.

Комфортная световая среда не ограничивается лишь количественными характеристиками света (освещенностью, яркостью). Его колориметрические, т.е. цветовые, параметры оказывают более важное воздействие. Таким образом, важным является формирование комфортной цветовой среды, благоприятной по спектральному составу излучения и воздействию на человека.

Для объективного описания и оценки цвета применяется строгий математический аппарат, научной основой для него является разработанная Международной комиссией по освещению (МКО) колориметрическая система XYZ 1931 г., которая позволяет однозначно определить цвет через его координаты цветности (x, y) . Это универсальный метод для спецификации и воспроизведения цвета. Колориметрическая система XYZ характеризуется нелинейностью: одинаковое геометрическое расстояние между двумя точками на цветовом графике (x, y) не соответствует одинаковой воспринимаемой разнице в цвете. Для решения этого вопроса разработаны более равномерные цветовые модели (например, CIE 1960 UCS), а также базовое понятие эллипсов МакАдама. Эллипсы визуализируют пороги цветоразличения: цвета внутри одного эллипса воспринимаются человеком как одинаковые.

Важнейшей интегральной характеристикой восприятия цвета источника света, особенно белого, является коррелированная цветовая температура (КЦТ). КЦТ количественно определяет субъективное ощущение «теплоты» или «холодности» белого цвета, связывая его с температурой абсолютно черного тела. КЦТ является промышленным стандартом для классификации и подбора источников света под конкретные задачи.

В современной светотехнической отрасли осуществляется переход на светодиоды (СИД), которые вытесняют традиционные источники света благодаря своей высокой энергоэффективности, долговечности и компактности. Однако именно специфика светодиодов – возможность формирования сложного спектрального состава за счет сочетания излучения люминофоров и кристаллов разного типа – ставит новые вопросы в области обеспечения качества цветопередачи.

Для оценки коррелированной цветовой температуры белых светодиодов применяется методика, описанная в национальном стандарте ГОСТ 34819-2021. Измерения проводят в направлении оптической оси осветительного прибора или в направлении, указанном в технической документации производителя, либо в сфере.

Измерение в сфере дает интегральное значение коррелированной цветовой температуры, не позволяя анализировать пространственное распределение этого параметра. А именно пространственное распределение коррелированной цветовой температуры характеризует качество наблюдаемой цветовой картины.

Таким образом, актуальность работы заключается в необходимости разработки методов оценки и улучшения пространственного распределения коррелированной цветовой температуры, поскольку именно эта характеристика определяет целостность и достоверность восприятия цветовой среды в реальных условиях наблюдения.

Степень разработанности темы

Изучению пространственного распределения координат цветности и КЦТ источников света посвящены работы представителей таких научных школ, как Национальный исследовательский университет ИТМО (Перетягин В.С., Чертов А.Н., Колодезный Е.С., Бородкин А.И., Рочас С.С., Козырева О.А., Бугров В.Е. и др.), Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Полисадова Е.Ф.), Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (Юнович А.Э., Туркин А.Н.), колледж Лёвенского католического университета (Ван Гилс М., Дюринк Г., Оденат Я. и др.), Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (Смирнов С.В., Давыдов В.Н., Туев В.И., Солдаткин В.С., Афонин К.Н.). Вместе с тем вопросы оценки пространственного распределения координат цветности и КЦТ полупроводниковых источников света на основе кристаллов и матриц GaN/InGaN решены не окончательно.

Целью работы является создание светодиодных источников света на основе GaN/InGaN с улучшенными значениями пространственного распределения КЦТ.

В настоящей работе достижение цели ограничено решением следующих задач:

1) разработка метода оценки однородности пространственного распределения координат цветности и КЦТ оптического излучения источников света на основе GaN/InGaN в шагах МакАдама;

2) оценка однородности пространственного распределения координат цветности и КЦТ светодиода и светодиодного источника света на основе матрицы GaN/InGaN кристаллов с применением разработанного метода;

3) разработка новых способов изготовления люминофорной композиции с применением диффузанта и использованием гравитационного осаждения частиц люминофора для светодиода и светодиодного источника света на основе кристаллов GaN/InGaN с улучшенным пространственным распределением КЦТ;

4) разработка новых светодиодных источников света с улучшенным значением пространственного распределения КЦТ.

Предмет исследования — пространственное распределение координат цветности и КЦТ светодиодных источников света. Под пространственным распределением понимается изменение координат цветности и КЦТ при отклоне-

нии от оптической оси светоизлучающего прибора, рассматриваемое в угловых координатах.

Объектами исследования являются светодиод и светодиодный источник света на основе кристаллов GaN/InGaN.

Научная новизна

Научная новизна работы определяется разработкой метода оценки пространственного распределения цветовых параметров в шагах МакАдама и созданием светодиодных источников света с улучшенным пространственным распределением КЦТ.

Научной новизной, в частности, обладают следующие основные результаты работы.

1. Метод оценки пространственного распределения координат цветности в шагах МакАдама, включающий определение угловой зависимости координат цветности, математическую обработку полученных результатов в системе CIE 1960 UCS с последующим расчетом отклонения цвета в шагах МакАдама, расширяющий область применения метода МакАдама и позволяющий выполнять численную оценку отклонения цвета в пространстве.

2. Установленная определенная взаимозависимость отклонения цвета в шагах МакАдама от концентрации диффузанта, при которой достигается минимальное значение неравномерности цвета в пространстве.

3. Способ отверждения люминофорной композиции, отличающийся от известных использованием гравитационного осаждения частиц люминофора и позволяющий улучшить пространственное распределение КЦТ.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в том, что разработан метод оценки пространственного распределения цветовых параметров светодиодов и светодиодных источников света в шагах МакАдама.

Практическая значимость работы заключается в разработке новых светоизлучающих устройств с улучшенным пространственным распределением КЦТ и новых технологических процессов изготовления светодиода и светодиодного источника света.

Разработаны новые устройства световых приборов и новый способ полимеризации люминофорной композиции с применением гравитационного осаждения частиц, защищенные патентами на изобретения и полезные модели:

- 1) светодиодная лента для лампы;
- 2) светоизлучающий диод;
- 3) светодиодная лампа;
- 4) осветительное устройство;
- 5) светильник комбинированный;
- 6) способ изготовления светоизлучающего диода.

Метод оценки пространственного распределения коррелированной цветовой температуры для светодиодов и светодиодных источников света, основанный на применении эллипсов МакАдама, внедрён на предприятии ООО «Современные источники света». Акт о внедрении приведён в приложении к диссертационной работе.

Новые технические решения устройств с улучшенным пространственным распределением коррелированной цветовой температуры, защищенные патентами на полезные модели № 193054 и №195810, использованы при выполнении работ по целевой программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» в рамках проекта «Разработка прототипов передовых технологических решений роботизированного интеллектуального производства электронной компонентной базы и энергоэффективных световых устройств». Неисключительные права на использование патентов переданы предприятию реального сектора экономики по лицензионному договору. Текст лицензионного договора приведен в приложении к диссертационной работе.

Результаты диссертационного исследования используются в учебном процессе при реализации программы бакалавриата в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» для выполнения физических экспериментов бакалаврами направления подготовки 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств», профиль «Электронные технологии наземного и космического назначения».

Методы исследования

В работе использованы методы теоретического (анализ) и эмпирического (эксперимент) исследования. Для обработки экспериментальных данных применен метод множественной линейной регрессии.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Метод оценки пространственного распределения цветовых параметров в шагах МакАдама, включающий математическую обработку полученных результатов в системе CIE 1960 UCS, отличающийся от известных определением угловой зависимости координат цветности и КЦТ с последующим расчетом шагов МакАдама, позволяет определять численное отклонение цвета в пространстве.

2. Процесс изготовления люминофорной композиции для светоизлучающего диода и светодиодного источника света с добавлением диффузанта на основе двуокиси кремния в объеме 5% от массы компаунда позволяет уменьшить пространственную неоднородность цвета на 2 шага МакАдама.

3. Новый способ изготовления светодиода, отличающийся от известных применением гравитационного осаждения частиц люминофора, позволяет уменьшить пространственную неравномерность цвета светодиода на 2 шага МакАдама.

Степень достоверности и апробация результатов

Результаты работы представлены на научно-технических конференциях различных уровней, среди которых международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР» (Россия, Томск, 2018, 2019, 2022, 2023, 2024); международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления» (Россия, Томск, 2016, 2018); международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики» (Россия, Томск, 2018, 2019, 2021); меж-

дународная конференция «Актуальные проблемы современной науки» (Россия, Омск, 2019); международная научно-техническая конференция «Микро- и нанотехнологии в электронике», (Россия, Нальчик, 2024); всероссийская научная конференция с международным участием «Невская фотоника-2025» (Россия, Санкт-Петербург, 2025); всероссийская научная конференция «Физика: Фундаментальные и прикладные исследования, образование» (Россия, Благовещенск, 2025).

Публикации

Основные результаты исследований опубликованы в 23 работах: трех статьях в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ; статье, индексируемой реферативной базой данных Scopus; в 13 материалах докладов на всероссийских и международных конференциях. По результатам исследований получены три патента на изобретения и три патента на полезные модели.

Личный вклад автора

Автором лично выполнены расчеты по численной оценке отклонения цвета в шагах МакАдама, проведен регрессионный анализ и получено аппроксимирующее выражение для координат цветности. Экспериментальные исследования и подготовка публикаций выполнены автором совместно с сотрудниками научно-исследовательского института светодиодных технологий ТУСУРа.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Объём работы составляет 130 страниц машинописного текста, включая 43 рисунка, 17 таблиц и список литературы из 158 наименований, из которых 82 отечественных и 76 зарубежных.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана оценка актуальности работы на основе аналитического обзора, сформулированы цель и задачи исследования, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены цветовые модели МакАдама, Беляевой-Матвеева и CIEDE2000. Проведено сравнение моделей по ключевым характеристикам и показано преимущество модели МакАдама.

На основании проведенного аналитического обзора установлено, что модель Беляевой-Матвеева применяется в текстильной промышленности для численной оценки цветовых параметров тканей и красок. Модель CIEDE2000 используется в полиграфии для численной оценки цветовых параметров оттисков на бумаге. Модель же МакАдама применима только для оценки допустимых отклонений цвета источников света.

Модель МакАдама основана на эллипсах цветовых различий, что соответствует визуальному восприятию цвета точечных источников света с возможностью наглядного представления зон допустимых отклонений цвета. Действующей нормативной документацией предусмотрена оценка значений КЦТ для 7- или 4-шаговой зоны допустимых отклонений цвета только в направлении оптической оси светоизлучающего прибора. При этом пространственное распределение КЦТ не нормируется.

В связи с этим необходима разработка метода оценки однородности пространственного распределения цветовых параметров оптического излучения источников света на основе GaN/InGaN в шагах МакАдама.

Во второй главе предложен метод оценки пространственного распределения цветовых параметров источников света в шагах Макадама.

Метод включает последовательное выполнение следующих операций.

1. Исследование координат цветности в пространстве

Исследования проводятся в ряде плоскостей с определенным шагом в пространстве и в ряде значений угловых координат в интервале от минус 90 до 90 градусов на каждой плоскости. Алгоритм предполагает поэтапное применение метода к данным в каждой из рассматриваемых плоскостей с последующим объединением полученных результатов в единую модель, описывающую пространственную вариацию цветовых параметров оптических приборов.

2. Применение метода множественной линейной регрессии

При проведении эксперимента выводится массив экспериментальных данных, которые обрабатываются методом математической статистики для того, чтобы отсеять некорректные данные и минимизировать влияние случайных погрешностей, повышая надежность экспериментальных результатов.

Используется метод корреляционного и регрессионного анализа, а именно метод множественной линейной регрессии для построения аппроксимирующей кривой и проверки правильности построения эксперимента. Данный метод применен в связи с возможностью использования нескольких переменных одновременно.

Предложенный метод оценки пространственного распределения цветовых параметров источников света в шагах МакАдама применим к следующим классам оптических приборов для осветительных систем: лампы и светильники внутреннего освещения бытового назначения, светильники внутреннего освещения промышленного назначения.

Ограничения метода связаны с ограничениями методики численной оценки отклонений цвета в шагах МакАдама, а именно с применимостью для источников с КЦТ 2500–6700 К при условии отсутствия в освещаемом пространстве видимых невооружённым глазом неоднородностей и резких перепадов цветности.

Предложенный метод для оценки пространственного распределения цветовых параметров оптического излучения в шагах МакАдама применен к светодиоду и светодиодному источнику света.

В керамический корпус светодиода с размерами $5 \times 2 \times 1$ мм установлен полупроводниковый кристалл с помощью теплопроводящего клея. Размеры кристалла по площади составляют $(1143 \pm 25 \times 1143 \pm 25)$ мкм. Электрическая мощность кристалла – 1,26 Вт. На кристалл, излучающий на длине волны 455 нм, нанесен слой желто-зеленого люминофора толщиной 1 мм. Синий свет от кристалла попадает на люминофор, благодаря чему люминофор светится жёлтым. При наложении синего и жёлтого излучения глаз воспринимает их как белый свет. Люминофор использован двух типов. Первый – порошок желто-зеленого цвета на основе иттрий-галлий-алюминиевого граната, активированного цери-

ем, с пиковой длиной волны излучения 530 нм. Средний размер частиц 17–20 мкм. Второй люминофор – порошок оранжево-красного цвета на основе нитридоалюмосиликата, активированного европием. Пиковая длина волны составляет 620 нм. Средний размер частиц 15–20 мкм. В качестве связующего использован силиконовый заливочный герметик НУ585Т. Электрическое соединение кристалла с металлическими выводами корпуса осуществлено с помощью проволоочного монтажа (разварки). Кристалл, применяемый в светодиоде, представлен на рисунке 1.

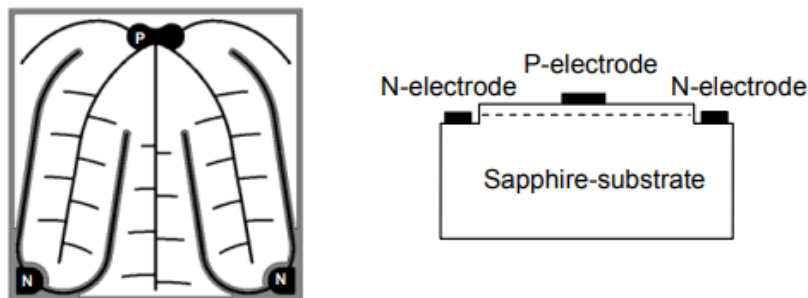


Рисунок 1 – Кристалл светодиода

Светодиодный источник света состоит из основания с металлическими выводами на концах, клеевого слоя, полупроводниковых GaN/InGaN-кристаллов и люминофорной композиции. Основание в виде нити имеет размеры $45 \times 1 \times 1$ мм и выводы длиной по 5 мм с каждой стороны. На поверхность основания нанесён слой теплопроводящего клея. Полупроводниковые кристаллы планарного типа в количестве 28 штук расположены на клеевом слое таким образом, чтобы длинная сторона кристалла была сонаправлена с длинной стороной основания. Основание с кристаллами окружено люминофорной композицией. Электрическое соединение кристаллов осуществлено с помощью проволоочного монтажа (разварки). Конструкция светодиодного источника света представлена на рисунке 2, где обозначено: 1 – металлический вывод, 2 – подложка из теплопроводящего материала с нанесенным клеевым слоем, 3 – излучающие кристаллы, 4 – соединительная проволока, 5 – люминофорная композиция.

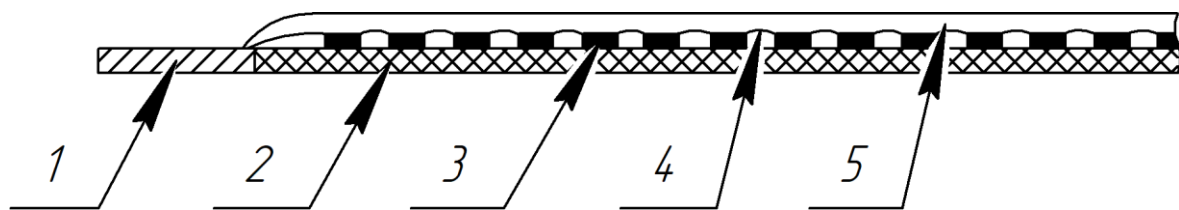


Рисунок 2 – Конструкция светодиодного источника света

Изготовлены 10 образцов светодиодов и 10 образцов светодиодных источников света. С целью минимизации случайной погрешности и повышения достоверности результатов исследования проведены для всех образцов, после чего полученные данные усреднены. Графики отклонения цвета светодиода и светодиодного источника света в диапазоне угловых координат от минус 90 до 90 градусов представлены на рисунках 3 и 4 соответственно.

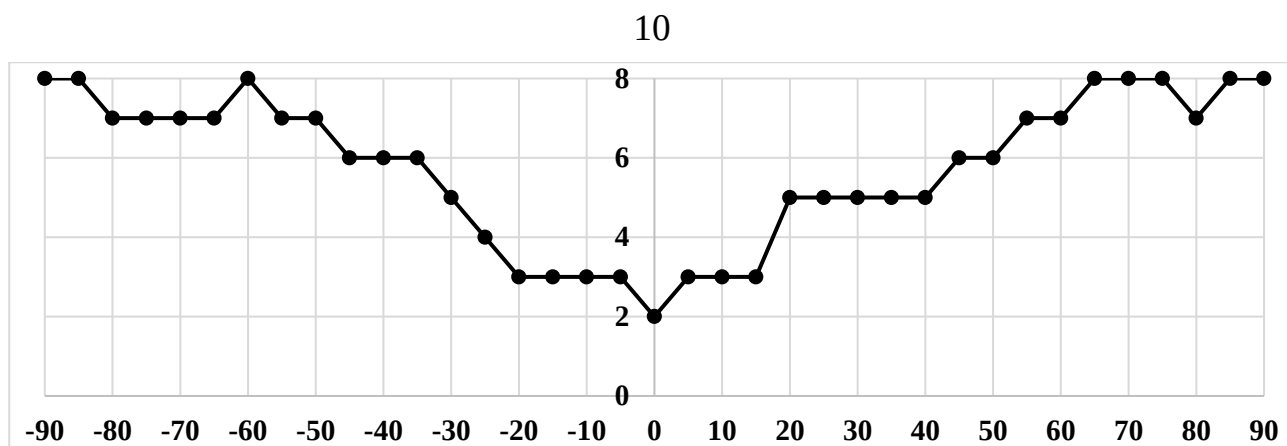


Рисунок 3 – График отклонения цвета светодиода в шагах МакАдама

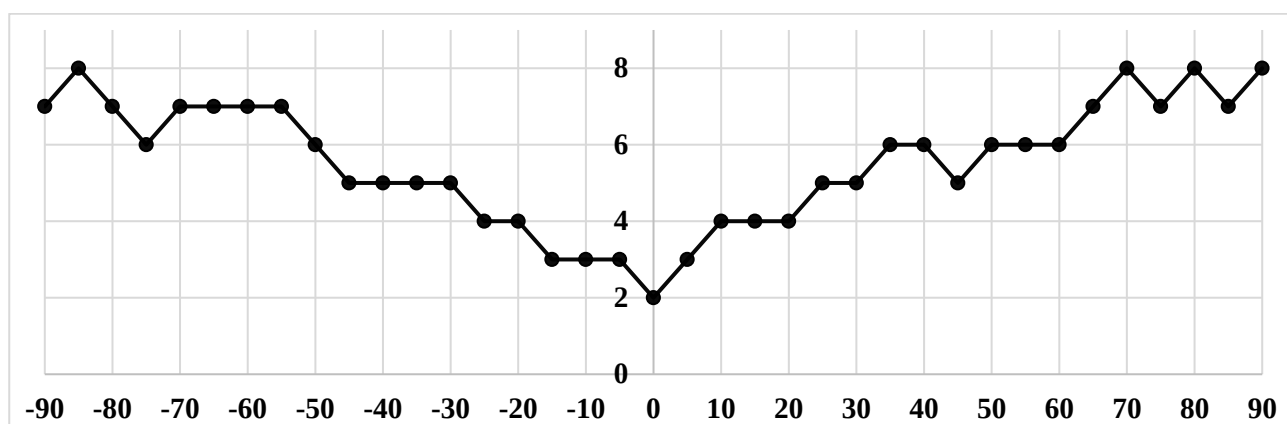


Рисунок 4 – График отклонения цвета светодиодного источника света в шагах МакАдама

Таким образом, метод оценки пространственного распределения цветовых параметров в шагах МакАдама, отличающийся от известных определением угловой зависимости координат цветности и КЦТ с последующим расчетом шагов МакАдама, позволяет определять численное отклонение цвета в пространстве.

Максимальное отклонение цвета достигает 8 шагов МакАдама, что свидетельствует о превышении порогового значения цветового различия, регламентированного для высококачественных источников света и, как следствие, о высокой видимо различимой разнотонности цвета при визуальном контроле или эксплуатации изделий. В связи с этим необходимо усовершенствовать конструкцию и технологию производства светодиода и светодиодного источника света для уменьшения пространственной неравномерности КЦТ.

В третьей главе описаны новые конструкции и новый процесс создания устройств оптического излучения с улучшенной равномерностью пространственного распределения цвета.

Новые конструкции оптических приборов с применением диффузанта

Сущность предлагаемого технологического решения заключается в добавлении диффузанта в люминофорную композицию светодиода и светодиодного источника света. Новые конструкции светодиода и светодиодного источника света приведены на рисунках 5 и 6.

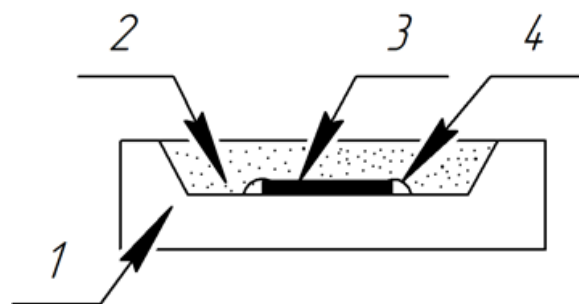


Рисунок 5 – Конструкция светодиода с диффузантом

На рисунке 5 обозначено: 1 – теплоотводящая основа с нанесенным клеевым слоем, 2 – люминофорная композиция с диффузантом, 3 – излучающий кристалл, 4 – соединительная проволока.

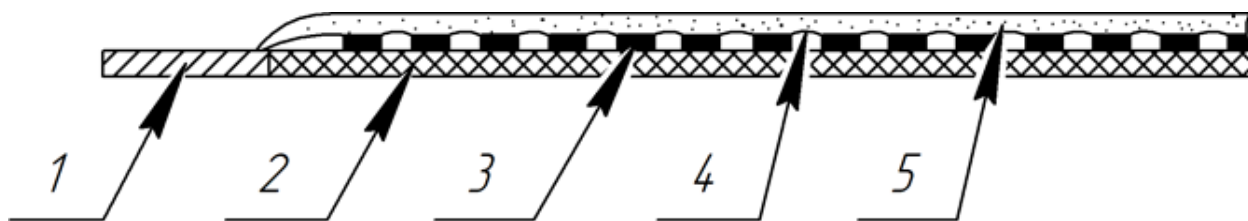


Рисунок 6 – Конструкция светодиодного источника света с диффузантом

На рисунке 6 обозначено: 1 – металлический вывод, 2 – подложка из теплопроводящего материала с нанесенным клеевым слоем, 3 – излучающие кристаллы, 4 – соединительная проволока, 5 – люминофорная композиция с диффузантом.

Для проведения исследования применен диффузант на основе двуокиси кремния ДФ-151, имеющий следующие свойства:

- 1) характеризуется минимальным поглощением света в видимой области спектра;
- 2) химически инертен и не проявляет фотокаталитических свойств, что обеспечивает стабильность параметров светодиода на протяжении всего срока службы.

Для выбора необходимой концентрации диффузанта проведены исследования светового потока и световой отдачи макетов светодиода, изготовленных при варьировании содержания диффузанта в интервале от 0 до 7%. Результаты измерений представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты измерений светового потока и световой отдачи светодиода

Концентрация диффузанта, %	Световой поток, лм	Световая отдача, лм/Вт	КЦТ, К
1	65,2±10%	98,05±10,02%	8239±5%
2	62,4±10%	105,94±10,02%	7186±5%
3	61,4±10%	100,99±10,02%	5520±5%
4	61±10%	100,33±10,02%	7186±5%
5	62,6±10%	102,96±10,02%	5395±5%

Продолжение таблицы 1

Концентрация диффузанта, %	Световой поток, лм	Световая отдача, лм/Вт	КЦТ, К
6	62±10%	98,88±10,02%	5042±5%
7	60±10%	98,68±10,02%	5881±5%
Без диффузанта	58,4±10%	99,15±10,02%	7847±5%

Исследования проводились в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, вертикальной и горизонтальной. На каждой плоскости исследования выполнялись в интервале $-90...+90$ градусов с шагом в 5 градусов.

Расхождения в данных по обеим плоскостям не превышали погрешность измерений, поэтому полученные данные усреднены. В качестве примера на рисунке 7 представлены результаты испытаний отклонения цвета в шагах МакАдама в зависимости от концентрации диффузанта для следующих угловых координат: минус 90° (темно-синий цвет), минус 45° (голубой), 0° (зеленый), 45° (красный) и 90° (оранжевый).

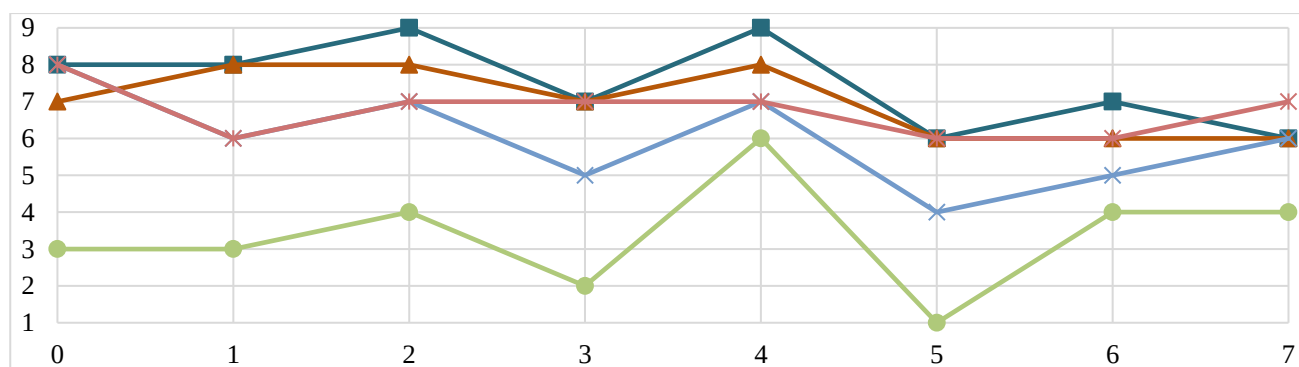


Рисунок 7 – График зависимости отклонения цвета в шагах МакАдама от концентрации диффузанта

Сравнение полученных графиков для всех угловых координат и в том числе показанных на рисунке 7 свидетельствует о том, что минимальное значение неравномерности цвета в пространстве достигается при значении концентрации диффузанта 5%. На основании этого принято решение использовать для дальнейших экспериментов значение концентрации диффузанта на основе двуокиси кремния 5%.

На рисунке 8 представлены графики отклонения цвета светодиода в пространстве: сплошная линия – с добавлением диффузанта; пунктирная линия – без добавления диффузанта.

При добавлении диффузанта отклонение цвета в диапазоне углов излучения от минус 90 до 90 градусов уменьшается на 2–4 шага МакАдама, что свидетельствует об увеличении равномерности КЦТ в пространстве.

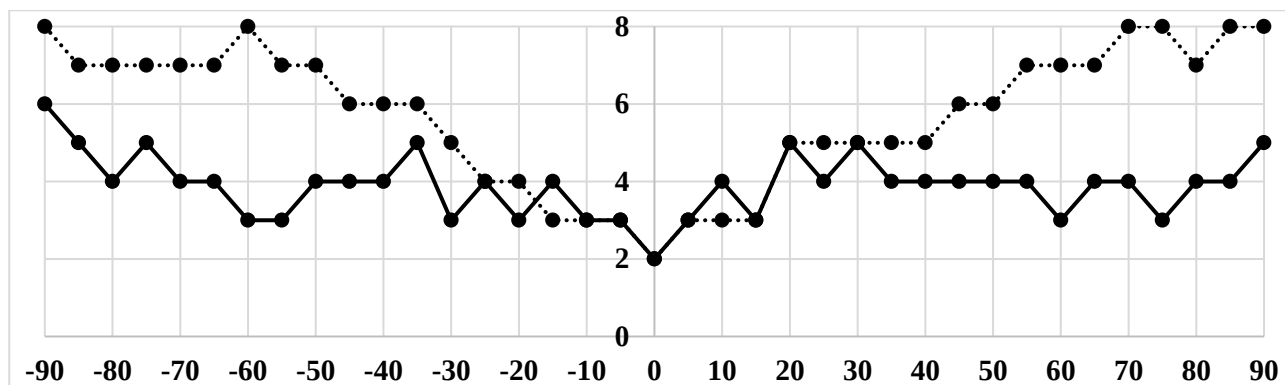


Рисунок 8 – График отклонения цвета светодиода в пространстве в шагах МакАдама

Предложенный источник света с улучшенным пространственным распределением координат цветности и КЦТ может быть применен в составе комбинированного источника света, также обладающего новизной, полезностью и защищенным патентом на полезную модель (патент № 2834209).

Экспериментально полученный график отклонения цвета в пространстве для светодиодного источника света (см. рисунок 4) представлен на рисунке 9.

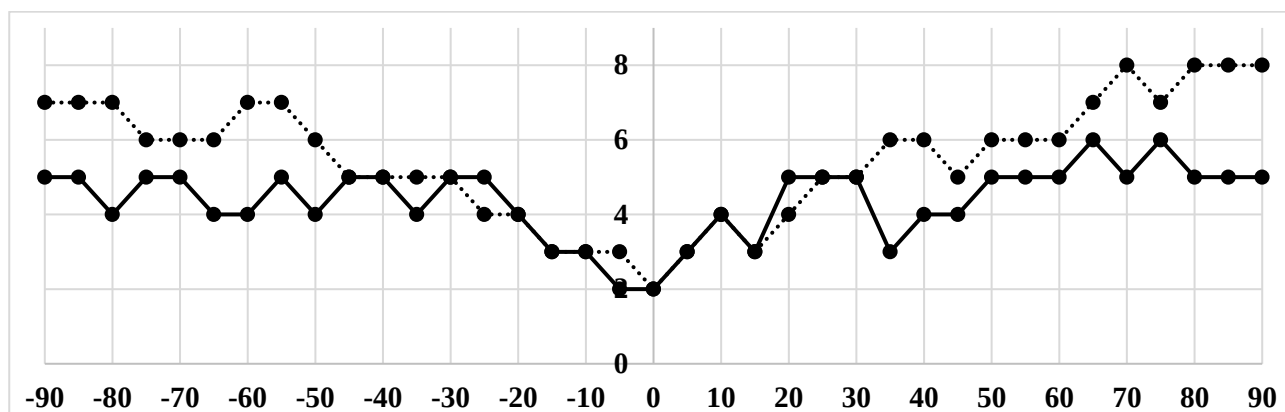


Рисунок 9 – График отклонения цвета светодиодного источника света в пространстве в шагах МакАдама

Применение технологии добавления диффузанта в люминофорную композицию позволяет разрабатывать светоизлучающие диоды, в том числе в составе устройств с искусственно созданной неравномерностью (патенты № 219968, № 2828620).

Новый процесс термической полимеризации люминофорной композиции в технологии изготовления светодиода

Использование гравитационного осаждения частиц люминофора в конструкции светодиода минимизирует попадание отраженного от частиц люминофора излучения на полупроводниковый кристалл, обладающий низкой отражающей способностью. Это приводит к повышению эффективности источника света и улучшению пространственного распределения КЦТ.

На рисунках 10–11 показаны характеристики светодиода при гравитационном осаждении частиц и без его использования. Пунктирной линией указаны

исходные значения характеристик, сплошной – при гравитационном осаждении частиц.

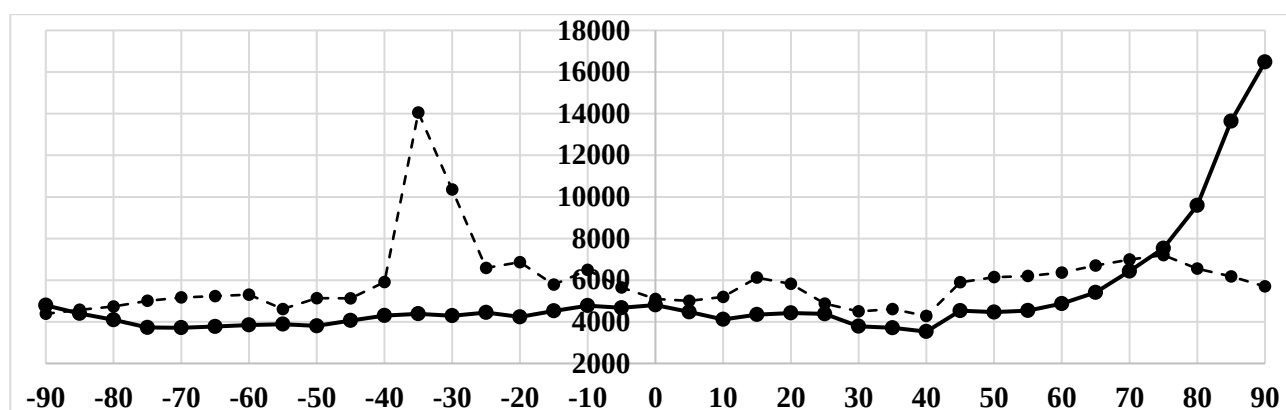


Рисунок 10 – Зависимость коррелированной цветовой температуры от угла излучения

На графике коррелированной цветовой температуры видно, что при гравитационном осаждении частиц значения находятся в интервале от 4500 до 5000 К.

График отклонения цвета светодиода в шагах МакАдама в пространстве представлен на рисунке 11. Пунктирной линией на нем указаны значения характеристик без применения гравитационного осаждения частиц, сплошной – при гравитационном осаждении частиц.

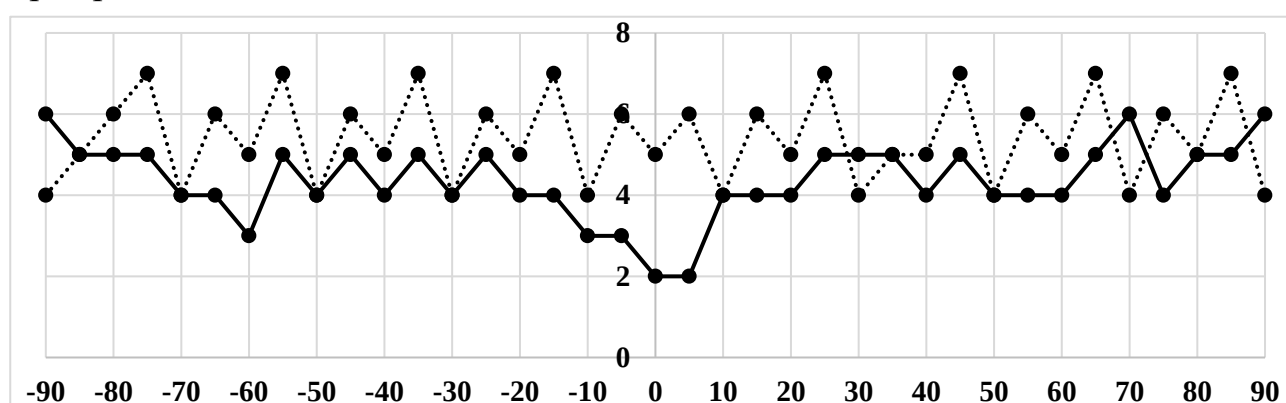


Рисунок 11 – График отклонения цвета в пространстве в шагах МакАдама

Новый способ изготовления светодиода отличается от известных применением гравитационного осаждения частиц люминофора и позволяет уменьшить пространственную неравномерность цвета светодиода на 2 шага МакАдама.

Предложенный способ обладает научной новизной и защищен патентом на изобретение.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В рамках диссертационного исследования цель достигнута, поставленные задачи решены и получены следующие основные результаты.

1. Разработан метод оценки пространственного распределения координат цветности в шагах МакАдама, включающий определение угловой зависимости

координат цветности, математическую обработку полученных результатов в системе CIE 1960 UCS с последующим расчетом отклонения цвета в шагах МакАдама, расширяющий область применения метода МакАдама и позволяющий выполнять численную оценку отклонения цвета в пространстве.

2. Установлена определенная взаимозависимость отклонения цвета в шагах МакАдама от концентрации диффузанта, при которой достигается минимальное значение неравномерности цвета в пространстве.

3. Установлено, что способ изготовления светоизлучающего диода, включающий монтаж кристалла на клей в углубление корпуса, соединение проволокой контактов кристалла и корпуса, приготовление жидкой люминофорной композиции и ее нанесение в углубление корпуса с последующей сушкой (полимеризацией) компаунда, отличающийся применением гравитационного осаждения частиц люминофора, позволяет достичь уменьшения пространственной неравномерности цвета на 2 шага МакАдама.

4. Разработаны новые устройства светодиода и светодиодного источника света с уменьшенной пространственной неравномерностью цвета на 2 шага МакАдама. Предложенный источник света с уменьшенным значением неравномерности пространственного распределения координат цветности и КЦТ может быть применен в составе комбинированного источника света, в том числе в составе устройств с искусственно созданной неравномерностью. Данные устройства защищены патентами на изобретения и полезные модели.

Таким образом, выполненная работа позволила решить научную задачу, имеющую значение для развития отрасли технических наук по специальности 2.2.6 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы» в исследовании и разработке новых методов и процессов, которые положены в основу создания оптических и оптико-электронных приборов класса осветительных устройств бытового и промышленного освещения с улучшенным пространственным распределением координат цветности и КЦТ.

Рекомендации

Полученные результаты рекомендуется применять в испытательных лабораториях для контроля качества светотехнической продукции, а также внедрять в учебном процессе и дальнейших научных исследованиях, направленных на развитие методов проектирования оптических и оптико-электронных приборов осветительного назначения

Перспективы дальнейшей разработки

Дальнейшее развитие работы связано с распространением результатов диссертационного исследования на другие классы оптико-электронных приборов, включая светодиодные лампы, прожекторы, светильники промышленного, медицинского и офисного назначения.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в ведущих рецензируемых изданиях

1. Андреева, М. В. Оценка пространственного распределения спектроколориметрических характеристик светодиодных ламп в шагах МакАдама / М. В.

Андреева, В. С. Солдаткин, В. И. Туев // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – № 3 (87). – С. 75–88.

2. Андреева, М. В. Разработка методики оценки пространственного распределения цветовых параметров в шагах МакАдама / М. В. Андреева, В. С. Солдаткин, В. И. Туев, С. Н. Кичук // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2024. – № 1 (146). – С. 4–18.

3. Андреева, М. В. Повышение световой отдачи светодиодов белого цвета свечения путем изменения химического состава люминофорных композиций / М. В. Андреева, К. Н. Афонин, В. С. Солдаткин, В. И. Туев, А. А. Иванов // Известия вузов. Приборостроение. – 2023. – Т. 66, № 9. – С. 741–749. – DOI 10.17586/0021-3454-2023-66-9-741-749.

Публикации в журналах, индексируемых базами Web of Science, SCOPUS

4. Andreeva, M. V. Investigation of phosphor compositions for led filament bulb / V. I. Tuev, V. S. Soldatkin, M. V. Andreeva, K. N. Afonin, A. A. Vilisov, E. S. Ganskaya. // Journal of Physics: Conference Series, Tomsk. – 2018. – Vol. 1115. – P. 052012. – DOI 10.1088/1742-6596/1115/5/052012.

Материалы международных и всероссийских конференций

5. Андреева, М. В. Исследование светотехнических и электрических параметров светодиодных излучающих элементов в критических условиях / Ю. И. Стасенко, А. А. Максименко, М. В. Андреева. – Текст: непосредственный // Электронные средства и системы управления – 2021. – Ч. 1. – С. 279–280.

6. Андреева, М. В. Исследование влияния термоэлектрической нагрузки на надёжность светодиодного излучающего элемента / М. В. Андреева, А. А. Максименко. – Текст: непосредственный // Актуальные проблемы современной науки: материалы VIII региональной научно-практической конференции с международным участием. – 2019. – С. 62–64.

7. Андреева, М. В. Исследование светотехнических свойств люминофорных композиций для светодиодов белого цвета свечения / Д. В. Кожокару, М. В. Андреева, Е. С. Ганская. – Текст: непосредственный // Электронные средства и системы управления. – 2019. – Ч. 2. – С. 7–9.

8. Андреева, М. В. Определение конструктивно-технологического запаса светодиодного излучающего элемента / А. А. Максименко, Е. С. Ганская, М. В. Андреева. – Текст: непосредственный // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2019. – № 1-1. – С. 282–284.

9. Андреева, М. В. Влияние линзы и отражателя в колбе на кривую силы света светодиодной лампы общего назначения / Ю. И. Стасенко, М. В. Андреева, Ю. В. Юлаева. – Текст: непосредственный // Актуальные проблемы современной науки: материалы VIII региональной научно-практической конференции с международным участием. – 2019. – С. 115–118.

10. Андреева, М. В. Пространственное распределение коррелированной цветовой температуры светодиодной лампы общего применения / М. В. Андреева, Е. С. Ганская, Е. С. Гайбович, А. И. Черепнев. – Текст: непосредственный // Электронные средства и системы управления – 2018. – № 1-1. – С. 249–252.

11. Андреева, М. В. Исследование оптических характеристик люминофорных композиций для белых светодиодов и светодиодных излучающих элементов / М. В. Андреева, Е. С. Ганская, Д. К. Нуриев, К. В. Тепляков. – Текст: непосредственный // Электронные средства и системы управления – 2018. – № 1-1. – С. 255–258.

12. Андреева, М. В. Исследование оптических характеристик люминофорных композиций светодиода белого цвета свечения / Е. С. Ганская, М. В. Андреева, Г. А. Косачева. – Текст: непосредственный // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2018. – № 1-2. – С. 307–309.

13. Андреева, М. В. Исследование отклонения цвета СИЭ от нормы в шагах Макадама / М. В. Андреева. – Текст: непосредственный // Научная сессия ТУСУР. – 2022. – Ч. 1. – С. 250–252.

14. Andreeva, M. V. Overview of the main parameters of LED emitting elements / М. В. Андреева. – Текст: непосредственный // Научная сессия ТУСУР. – 2022. – Ч. 2. – С. 305–307.

15. Андреева, М. В. Исследование гранулометрического состава люминофоров для изготовления люминофорной композиции / М. В. Андреева. – Текст: непосредственный // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2023. – Ч. 2. – С. 66–68.

16. Andreeva, M. V. Studying the Dependence of LED Characteristics on the Distance of the Phosphor from the Crystal / М. В. Андреева. – Текст: непосредственный // Научная сессия ТУСУР. – 2024. – Ч. 2. – С. 288–290.

17. Андреева, М. В. Оценка пространственного распределения цветовых параметров светоизлучающих диодов в шагах Макадама / М. В. Андреева, В. И. Туев, В. С. Солдаткин, С. Н. Кичук. – Текст: непосредственный // Микро- и нанотехнологии в электронике: материалы XIV Международной научно-технической конференции. – 2024. – С. 321–324.

Патенты

18. Патент № 193054 Российская Федерация, МПК F21S 4/20 (2016.01); F21V 9/00 (2015.01). Светодиодная лента для лампы: № 2019119283: заявл. 19.06.2019; опубл. 11.10.2019 / Андреева М. В., Афонин К. Н., Вилисов А. А., Ганская Е. С., Солдаткин В. С., Туев В. И., Тепляков К. В.; заявитель ФГБОУ ВО «ТУСУР». – 9 с.

19. Патент № 195810 Российская Федерация, МПК F21V 14/00 (2006.01). Светоизлучающий диод: № 2019130932: заявл. 27.09.2019; опубл. 05.02.2020 / Андреева М. В., Вилисов А. А., Ганская Е. С., Солдаткин В. С., Туев В. И., Тепляков К. В., Юлаева Ю. В.; заявитель ФГБОУ ВО «ТУСУР». – 9 с.

20. Патент № 2834209 Российская Федерация, МПК F21V 33/00 (2006.01), H05B 45/20 (2020.01). Светильник комбинированный: № 2024111936: заявл. 02.05.2024; опубл. 04.02.2025 / Андреева М. В., Солдаткин В. С., Туев В. И., Хомяков А. Ю., Афонин К. Н., Ермолаев А. В., Шнайдер Е. В.; заявитель ФГБОУ ВО «ТУСУР». – 9 с.

21. Патент № 219968 Российская Федерация, МПК F21V 33/00 (2006.01). Светодиодная лампа: № 2023109005: заявл. 11.04.2023; опубл. 16.08.2023 / Ан-

дреева М. В., Солдаткин В. С., Туев В. И., Хомяков А. Ю.; заявитель ФГБОУ ВО «ТУСУР». – 7 с.

22. Патент № 2828620 Российская Федерация, МПК F21V 14/08 (2006.01). Осветительное устройство: № 2024109014: заявл. 04.04.2024: опубл. 14.10.2024 / Андреева М. В., Солдаткин В. С., Туев В. И., Хомяков А. Ю., Золотухина Е. А., Афонин К. Н., Ермолаев А. В., Незнамова Е. Г., Терещенко Н. Н.; заявитель ФГБОУ ВО «ТУСУР». – 9 с.

23. Патент № 2853466 Российская Федерация, МПК H10N 20/01 (2025.01), H10N 20/851 (2025.01). Способ изготовления светоизлучающего диода: № 2025118452: заявл. 03.07.2025: опубл. 23.12.2025 / Андреева М. В., Афонин К. Н., Ермолаев А. В., Солдаткин В. С., Туев В. И.; заявитель ФГБОУ ВО «ТУСУР». – 8 с.