

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
(ТУСУР)

На правах рукописи



Андреева Мария Владимировна

**СВЕТОДИОДНЫЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ
GaN/InGaN С УЛУЧШЕННЫМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ
РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ КОРРЕЛИРОВАННОЙ ЦВЕТОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ**

Специальность 2.2.6 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Тувев Василий Иванович

Томск 2026

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	5
1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР	12
1.1 Комфортная световая среда	12
1.2 Диаграмма цветности CIE 1931/1976.....	13
1.3 Цветовые модели.....	19
1.3.1 Введение в цветовые модели	19
1.3.2 Модель МакАдама	22
1.3.3 Модель Беляевой-Матвеева	25
1.3.4 Модель CIEDE2000.....	27
1.3.5 Сравнение цветовых моделей.....	31
1.4 Анализ конструкции и характеристик оптических приборов	33
1.4.1 Типы светодиодных кристаллов.....	34
1.4.2 Спектральные характеристики	36
1.4.3 Коррелированная цветовая температура.....	38
1.4.4 Конструкция светодиода	38
1.4.5 Конструкция светодиодного источника света	40
1.4.6 Процесс изготовления светодиодов и светодиодных источников света.....	41
1.4.7 Люминофорная композиция	44
1.4.8 Выбор люминофоров для дальнейшего исследования и разработки метода оценки однородности пространственного распределения цветовых параметров	47
1.4.9 Сравнение различных типов диффузентов	49
1.5 Регрессионный анализ и аппроксимация кривой координат цветности....	53

1.6 Цели и задачи работы	61
2 МЕТОД ОЦЕНКИ ОДНОРОДНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЦВЕТОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ	62
2.1 Исходные предпосылки.....	62
2.2 Метод оценки однородности пространственного распределения цветowych параметров оптических приборов	62
2.3 Применение метода оценки однородности пространственного распределения цветowych параметров оптического излучения к светодиоду ..	64
2.4 Применение метода оценки однородности пространственного распределения цветowych параметров оптического излучения к светодиодному источнику света	69
2.5 Выводы по разделу 2	75
3 НОВЫЕ СПОСОБЫ И ПРОЦЕССЫ СОЗДАНИЯ ПРИБОРОВ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С УЛУЧШЕННЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ РАВНОМЕРНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЦВЕТА .	77
3.1 Исходные предпосылки.....	77
3.2 Новые конструкции оптических приборов с применением диффузанта ...	77
3.2.1 Новая конструкция светодиода с применением диффузанта.....	77
3.2.2 Новая конструкция светодиодного источника света с применением диффузанта	82
3.2.3 Сравнительные эксперименты с зарубежными аналогами	86
3.3 Новый процесс термической полимеризации люминофорной композиции в технологии изготовления светодиода	91
3.4 Выводы по главе 3.....	95
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	97

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ	99
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	100
ПРИЛОЖЕНИЕ А (справочное) Копии подтверждающих документов	119
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (справочное) Перечень средств измерений и испытательного оборудования	129

ВВЕДЕНИЕ

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 [1].

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 [2].

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, Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) 1960 Uniform Color Space (UCS)), а также базовое понятие эллипсов МакАдама. Эллипсы визуализируют пороги цветоразличения: цвета внутри одного эллипса воспринимаются человеком как одинаковые [3-6].

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 индустриальным стандартом для классификации и подбора источников света под конкретные задачи [7,8].

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 [13]. 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 [13].

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. [14], Колодезный Е.С. [15], Бородкин А.И., Рочас С.С., Бугров В.Е. [12,16] и др.), Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Полисадова Е.Ф. [17]), Московский государственный университет

имени М.В. Ломоносова (Юнович А.Э., Туркин А.Н. [10,18,19]), Лёвенского католического университета (Ван Гилс М., Дюринк Г., Однат Я. [20] и др.), Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (Смирнов С.В., Давыдов В.Н., Туев В.И., Солдаткин В.С., Афонин К.Н. [21-24]). 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 отклонении от оптической оси светоизлучающего прибора, рассматриваемым 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 А.

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); международная 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.

1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

1.1 Комфортная световая среда

Для обеспечения успешной зрительной работы и активной деятельности человека важное значение имеет создание рационального освещения. Обеспечение благоприятных условий видения способствует не только успешному выполнению трудовых функций, но и предотвращению производственного травматизма.

Свет – это ключевой элемент нашей способности видеть, оценивать форму, цвет и перспективу предметов, окружающих нас в повседневной жизни. С помощью зрения человек получает большую часть информации (примерно 80%), поступающей из окружающего мира [25]. Кроме того, такие элементы человеческого самочувствия, как душевное состояние или степень усталости зависят от освещения и цвета окружающих нас предметов. С точки зрения безопасности труда зрительная способность и зрительный комфорт чрезвычайно важны [1].

Свет – это воспринимаемое глазом электромагнитное излучение с длинами волн от 380 до 760 нанометров [26].

Одним из важных документов, устанавливающим параметры освещения, являются Санитарные правила и нормы СанПиН 2.21/2.1.1.1278-03 [27].

Комфортная световая среда – это не только правильная интенсивность освещения, но и его спектральный состав [28]. Именно свет определяет, как мы воспринимаем цвет. Следовательно, следующим критически важным аспектом выступает комфортная цветовая среда. Комфортная цветовая среда – это гармоничное сочетание цветов в пространстве, которое не вызывает зрительного напряжения, положительно влияет на психофизиологическое состояние человека и соответствует функциональному назначению помещения [2,29].

Основные факторы комфортной цветовой среды:

1. Цветовой баланс. Сочетание тёплых и холодных оттенков без резких контрастов. Использование природных (естественных) цветов (например, зелёный, голубой).

2. Учёт освещения. Естественный свет усиливает восприятие цвета, поэтому важно тестировать оттенки при разном освещении [30].

3. Психологическое воздействие. Тёплые цвета (оранжевый, жёлтый) – стимулируют активность. Холодные цвета (синий, зелёный) – успокаивают и расслабляют. Нейтральные (белый, серый) – создают ощущение простора [31].

4. Функциональность. В офисах рекомендуются нейтральные и холодные оттенки для концентрации. В жилых помещениях – тёплые и мягкие тона для уюта.

5. Безопасность. Необходимо ограничить применение агрессивных цветов (например, ярко-красный в больших количествах может вызывать раздражение) [32].

Так как комфортная цветовая среда определяется строгими требованиями к визуальному восприятию, её параметры могут быть формализованы через диаграмму цветности CIE [33]. На основании СП 52.13330.2016 [28] ключевые показатели комфорта – цветовая температура, равномерность цветопередачи и допустимые цветовые отклонения – отображаются на диаграмме цветности в координатах CIE 1931/1976 [34,35].

1.2 Диаграмма цветности CIE 1931/1976

Диаграмма цветности – это графическое представление всех цветов, видимых человеческим глазом, в стандартизированной системе координат. Наиболее известна диаграмма CIE 1931 (xy), разработанная Международной комиссией по освещению (МКО) или Commission Internationale de l'Éclairage (CIE).

В 1931 г. Международная комиссия по освещению утвердила колориметрическую систему определения цвета XYZ. Эта система построена на трех основных цветах X, Y и Z, являющихся в этой системе единичными [35].

X, Y, Z — это не реальные цвета света, а абстрактные "базисные векторы" (или "единичные стимулы") новой, специально созданной математической системы координат для описания цвета. Они являются "единичными" в том, что они задают основу трёхмерного цветового пространства, в котором любой реальный цвет представляется в виде суммы этих трёх компонентов с определёнными коэффициентами.

Каждый цветовой оттенок, характеризующийся спектральной плотностью мощности излучения $P(\lambda)$ можно выразить набором трех параметров:

$$X = \int_{\lambda} \bar{x}(\lambda) P(\lambda) d\lambda, \quad (1.1)$$

$$Y = \int_{\lambda} \bar{y}(\lambda) P(\lambda) d\lambda, \quad (1.2)$$

$$Z = \int_{\lambda} \bar{z}(\lambda) P(\lambda) d\lambda, \quad (1.3)$$

где X, Y и Z – значения трех основных цветов, соответствующие возбуждению (т.е. мощности) каждого из составляющих цветов (красного, зеленого и синего), необходимых для получения излучения цвета $P(\lambda)$. Значения X, Y и Z указывают на количество красного, зеленого и синего цвета в спектре;

$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ – функции согласования цвета. Эти три функции отражают тот факт, что человеческое зрение трехцветное. Это означает, что цвет любого источника излучения может быть описан набором данных переменных, являющимися безразмерными величинами.

В уравнениях (1.1)-(1.3) цветовые параметры выражаются через интегралы от спектральных распределений, физическая размерность которых соответствует мощности излучения (Вт). Однако в практических применениях эти параметры обычно приводятся к безразмерному виду за счет введения нормировочных коэффициентов с размерностью $[\text{Вт}^{-1}]$, устраняющих зависимость от абсолютных энергетических величин. Однако, если для получения безразмерных параметров использовать приведенные ниже соотношения, дополнительные коэффициенты становятся не нужны [3,36].

Для получения безразмерных параметров вводятся координаты цветности x , y и z , определяемые из значений трех основных цветов по формулам

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}, \quad (1.4)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}. \quad (1.5)$$

Таким образом, значение координаты цветности определяет степень возбуждения одной из групп цветовых рецепторов, нормированную на суммарное возбуждение $(X + Y + Z)$. Значение координаты z вычисляется при помощи аналогичного выражения:

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} = 1 - x - y. \quad (1.6)$$

В то время как, значения X , Y и Z увеличиваются с увеличением яркости, значения x , y и z не зависят от нее и определяют только цветность. Более того, как следует из уравнений (1.4-1.6), $x + y + z = 1$ и, таким образом, только две из координат x , y и z необходимы для полного определения цветности. Повсеместно используемая Диаграмма Цветности МКО (рисунок 1.1 а, б) использует координаты цветности x и y , не используя координату z , поскольку она зависима от первых двух [3].

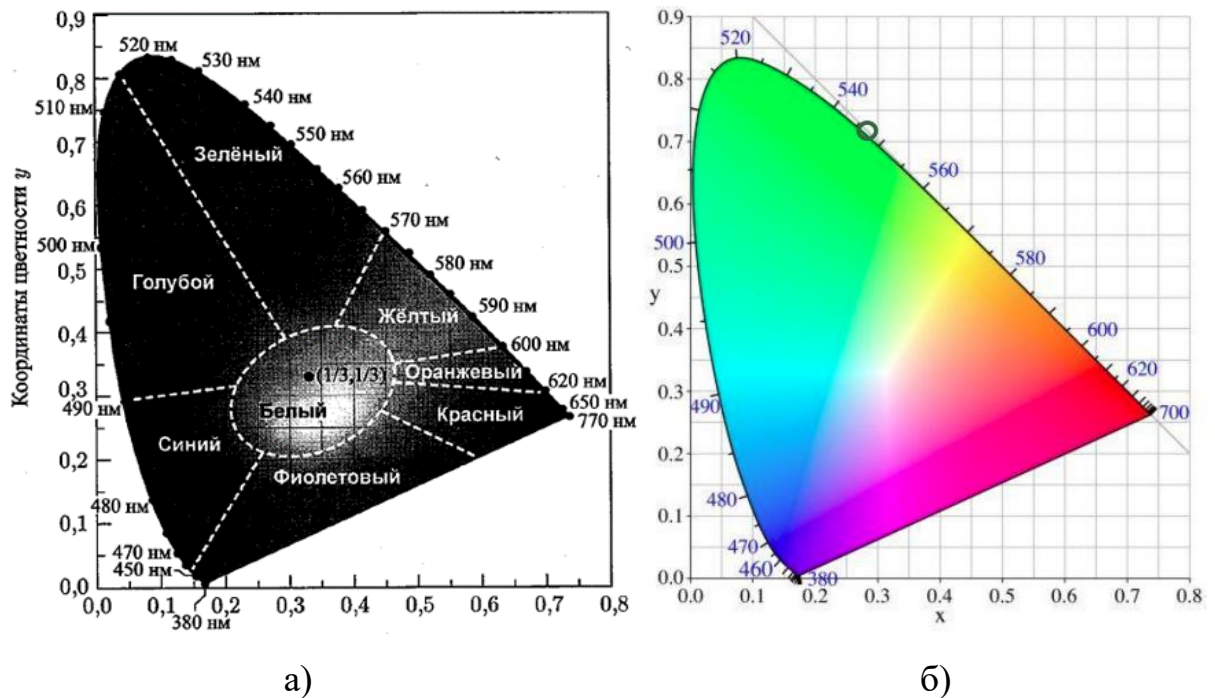


Рисунок 1.1 – Цветовая диаграмма МКО 1931 года, (а) – черно-белый вариант, (б) – цветной вариант

Монохроматические цвета расположены по периметру диаграммы. Насыщенность цвета уменьшается в направлении к центру графика. Белый цвет расположен в центре. Показаны области «чистых» цветов (рисунок 1.1 б) [37].

Диаграмма цветности имеет форму треугольника, потому что любой цвет может быть получен смешением трёх цветов.

Это утверждение сделано английским физиком и врачом Томасом Юнгом в 1802 году [38]. Он считал, что в глазу находятся три вида светочувствительных окончаний нервных волокон, и при раздражении волокон каждого отдельного вида возникают ощущения красного, зелёного и синего цвета. При раздражении нервных волокон всех видов возникают ощущения всевозможных других цветов, которые можно рассматривать как смеси трёх цветов основных раздражений.

Для определения сложных цветов Юнг предложил пользоваться графиком, подобным круговой цветовой диаграмме, но имеющим форму треугольника (диаграмма МКО 1931 года), в вершинах которого находятся точки трёх основных цветов [39].

Комиссия МКО решила ориентировать треугольник xy таким образом, что равные количества перенасыщенных основных цветов XYZ давали в сумме белый. Диаграмма представляет собой видимое множество цветов. На контуре проставляют значения длин волн в нанометрах, соответствующие чистым, неразбавленным цветам. В центре области находится опорный белый цвет – точка равных энергий, с координатами $x = y = 0,33$ [40].

Система (x, y) подчиняется законам Грассмана [41]. Наибольшую площадь занимают цвета с преобладанием зеленого. Герман Гюнтер Грассман – немецкий физик, математик и филолог.

Законы Грассмана описывают эмпирические результаты о том, как восприятие смесей цветных источников света (т. е. источников, которые совместно стимулируют одну и ту же область сетчатки), состоящих из различных распределений спектральной мощности, может быть алгебраически связано друг с другом в контексте подбора цвета. Обнаруженные Германом Грассманом эти законы на самом деле являются принципами, используемыми для прогнозирования реакции на совпадение цветов в приближении при фотопическом (дневном) и мезопическом (сумеречном) зрении [42].

Первый закон: Два цветных источника света выглядят по-разному, если они отличаются либо доминирующей длиной волны, либо яркостью, либо чистотой цвета. Чистота цвета — количественная мера насыщенности цветового ощущения относительно спектрально чистого цвета той же цветности. Следствие: для каждого цветного источника света существует источник с дополнительным цветом, так что смесь обоих источников света либо обесцвечивает более интенсивный компонент, либо дает неокрашенный (серый / белый) свет.

Второй закон: внешний вид смеси света, состоящей из двух компонентов, меняется, если меняется любой из компонентов. Следствие: смесь двух цветных источников света, которые не дополняют друг друга, приводит к смеси, которая меняется по оттенку в зависимости от относительной интенсивности каждого источника света и по насыщенности в зависимости от расстояния между оттенками каждого источника света.

Третий закон: существуют источники света с разным распределением спектральной мощности, но кажущиеся идентичными. Первое следствие: такие идентичные источники света должны иметь идентичные эффекты при добавлении к смеси света. Второе следствие: такие идентичные появляющиеся огни должны иметь идентичные эффекты при вычитании (т. е. фильтрации) из смеси света.

Четвертый закон: интенсивность смеси источников света равна сумме интенсивностей компонентов. Это также известно, как закон Эбни [43, 44].

В 1960 г. введены новые координаты цветности, отличные от рассмотренных выше координат (x, y) . Цель этого нововведения заключалась в создании универсальной цветовой диаграммы. В 1960 г. МКО ввела координаты (u, v) , а в 1976 г. – координаты (u', v') , которые были названы универсальными координатами цветности [3-5]

$$u = u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z}, \quad (1.6)$$

$$v = \frac{6Y}{X + 15Y + 3Z}, \quad (1.7)$$

$$v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z}. \quad (1.8)$$

Координаты (u, v) и (u', v') можно получить из координат (x, y) при помощи следующих выражений:

$$u = u' = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}, \quad (1.9)$$

$$v = \frac{6y}{-2x + 12y + 3}, \quad (1.10)$$

$$v' = \frac{9y}{-2x + 12y + 3}. \quad (1.11)$$

Координаты цветности (u', v') в системе CIE 1976 UCS (Uniform Color Space) [45] обеспечивают равномерное представление цветовых различий, но не описывают полные цветовые характеристики, в данной работе осуществляется

переход к цветовым моделям. На основании ГОСТ Р ИСО 11664-6 и CIE 15:2018 выполняется преобразование координат цветности в модели CIELAB и CIEDE2000 через расчёт светлоты (L), хроматичности (a^* , b^*) и цветового тона (h°), что позволяет количественно оценивать как абсолютные цветовые параметры, так и различия между цветами (ΔE) [46,47].

1.3 Цветовые модели

1.3.1 Введение в цветовые модели

Современные технологии визуализации и обработки изображений активно используют цветовые модели для точного представления и воспроизведения цветов. Цветовая модель – это математический способ описания цвета с помощью числовых значений, позволяющий унифицировать его передачу в цифровых устройствах, полиграфии, дизайне и других областях [48].

Численное отклонение $\Delta u'v'$ является важным инструментом для оценки цветовых различий, но его применение и интерпретация зависят от используемой цветовой модели. Рассмотрим ключевые взаимосвязи.

1. Связь CIE 1931 XYZ и CIE 1976 UCS.

Данная связь позволяет выполнять преобразования из системы CIE 1931 (xy) в систему CIE 1976 ($u'v'$) и обратно. Формулы (1.9) и (1.11) позволяют перейти от пространства xy к пространству $u'v'$ [47, 49].

Обратное преобразование осуществляется с помощью следующих формул [28,30]:

$$x = \frac{9u'}{6u' - 16v' + 12}, \quad (1.12)$$

$$y = \frac{4v'}{6u' - 16v' + 12}. \quad (1.13)$$

Система $\Delta u'v'$ корректирует недостатки CIE 1931, где одинаковые расстояния на диаграмме не соответствуют равным визуальным различиям. Например, в ху-пространстве синие цвета "сжаты", а зелёные "растянуты". В $u'v'$ это исправлено.

2. Связь CIELAB ($L^*a^*b^*$) и CIE 1976 UCS. В таблице 1.1 представлены ключевые различия между системами $\Delta u'v'$ (CIE 1976) и ΔE^*ab (CIELAB).

Таблица 1.1 – Ключевые отличия между системами $\Delta u'v'$ (CIE 1976) и ΔE^*ab (CIELAB)

Параметр	$\Delta u'v'$ (CIE 1976)	ΔE^*ab (CIELAB)
Основа	Линейное преобразование ху	Нелинейное преобразование XYZ
Учёт яркости	Нет (только цветность)	Да (L^* — светлота)
Применение	Источники света	Поверхности, материалы

Система $\Delta u'v'$ используется для сравнения источников света (СИД, лампы). Тогда как система ΔE^*ab — для оценки различий между окрашенными поверхностями [50, 51].

3. Связь CIE 1976 UCS с CIEDE2000 (ΔE_{00}).

Современные исследования в области колориметрии направлены на разработку метрик, обеспечивающих максимально точное соответствие между численными значениями цветовых различий и их восприятием человеческим зрением [52]. В этом контексте значительный интерес представляет метрика CIEDE2000 [53] (ΔE_{00}), которая является усовершенствованной версией более ранних моделей (таких как ΔE_{76} и ΔE_{94} [54,55]).

Усовершенствования в CIEDE2000:

1) учёт неравномерности цветового пространства — метрика включает корректирующие коэффициенты, учитывающие нелинейность восприятия цветовых различий в зависимости от светлоты (L), насыщенности (C) и тона (h);

2) адаптация к различным областям цветового пространства — в отличие от более простых метрик, CIEDE2000 обеспечивает лучшую точность в зонах, где

человеческое зрение наиболее чувствительно к отклонениям (например, вблизи нейтральных цветов) [46,56].

В то же время, метрика $\Delta u'v'$, основанная на равноконтрастном цветовом пространстве CIE 1976 UCS (u',v'), остаётся линейной и демонстрирует высокую эффективность при оценке малых цветовых отклонений, особенно в области белого света. Это делает её предпочтительной для задач, связанных с калибровкой источников освещения и дисплеев [57].

4. Связь со специализированными цветовыми моделями.

Помимо стандартизированных метрик, существуют специализированные модели, разработанные для конкретных прикладных задач:

а) Модель Беляевой-Матвеевой (ΔE_{BM})

Данная модель применяется в отраслях, где требуется учёт специфики материалов, таких как текстиль и лакокрасочные покрытия (ЛКП). Её ключевая особенность – использование адаптивных коэффициентов, позволяющих более точно оценивать цветовые различия с учётом особенностей отражающих поверхностей. Комбинирование ΔE_{BM} с метрикой $\Delta u'v'$ может быть полезным для контроля цветопередачи при различном освещении, что особенно актуально в промышленной колориметрии [58].

б) Модель МакАдама (эллипсы допустимых отклонений)

Эта модель исторически сыграла важную роль в понимании порогов цветоразличения. Эллипсы МакАдама в координатах xy (пространство CIE 1931) визуализируют зоны, в пределах которых цветовые различия остаются незаметными для наблюдателя. Интересно, что при переходе в пространство $u'v'$ (CIE 1976) эти эллипсы приближаются к окружностям, что подтверждает более равномерную воспринимаемость цветовых различий в данной системе [6].

В последующих разделах данные модели рассмотрены более детально, с акцентом на их математический аппарат и практическое применение.

1.3.2 Модель МакАдама

Эллипс Макадама представляет собой область на диаграмме цветности, которая содержит все цвета, неотличимые для обычного человеческого глаза от цвета в центре эллипса. Таким образом, контур эллипса представляет едва заметные различия цветности. Эллипс разработан и назван по имени ученого Дэвида Макадама. Он экспериментировал с восприятием цвета и различиями в цветности. Впоследствии он перенес результаты исследований на диаграмму цветности CIE, которая используется с 1931 года [6].

Центр эллипса соответствует целевому значению цветовой температуры источника света, а края показывают допустимое отклонение. Краткая форма SDCM (Standard Deviation of Colour Matching) стала официальной единицей измерения этих шагов отклонения и означает стандартное отклонение согласования цветов [59].

Количество шагов описывает разные степени видимости: если есть цветовые различия в пределах только одного шага эллипса Макадама, они не распознаются человеческим глазом. Даже при двух-трех шагах (3 сSDCM) отклонения практически не заметны. В таблице 1.2 представлен обзор степени видимости шагов Макадама [60].

Таблица 1.2 – Степени видимости шагов Макадама

Шаги Макадама (SDCM)	Видимость
1	Видимых отклонений практически нет
2	Отклонения можно увидеть с помощью инструментов
3	Немногочисленные отклонения, видимые человеческим глазом
4	Видимые отклонения
5-7	Сильно заметные отклонения

Видно, что эллипсы в голубой и зеленой областях заметно различаются по размерам, поэтому геометрическое расстояние между двумя точками на цветовой

диаграмме не связано линейной зависимостью с разницей в цвете этих двух точек (рисунок 1.2) [58].

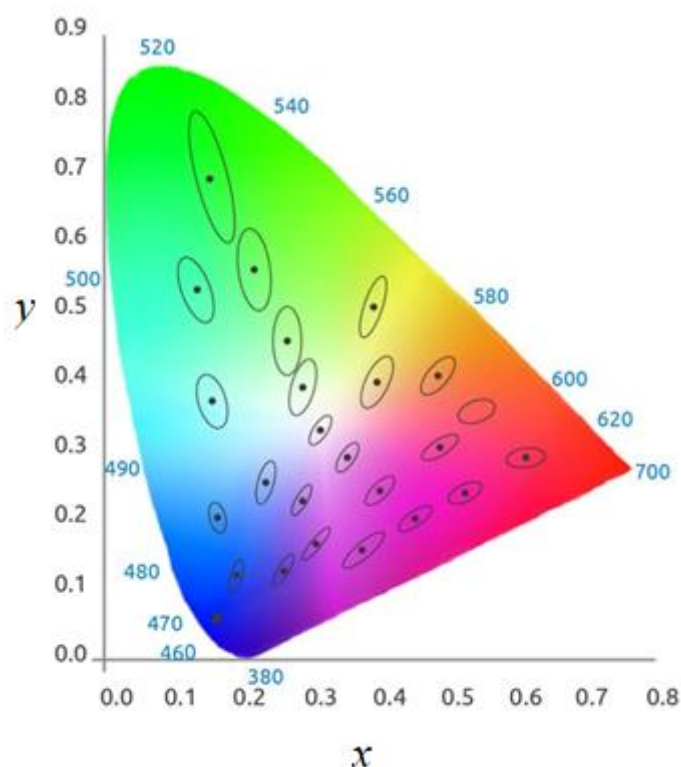


Рисунок 1.2 – Эллипсы МакАдама на диаграмме цветности

Общее число различных цветовых оттенков может быть найдено делением площади цветового графика на среднюю площадь эллипсов МакАдама. Проведя такие вычисления, установлено, что человек может различать 30000 различных цветовых оттенков [61].

Основным недостатком нормирования однородности цветности излучения, основанного на эллипсах МакАдама является то, что эллипсы МакАдама представляют порог цветоразличения, что представляет очень малые визуальные цветовые различия, обычно меньшие, чем просто заметная разница в цветности. При этом линейное увеличение эллипсов МакАдама не может предсказать надпороговые (малые, средние и большие) визуальные различия цвета [62];

На рисунке 1.3 представлена визуализация шагов МакАдама в виде четырехугольников.

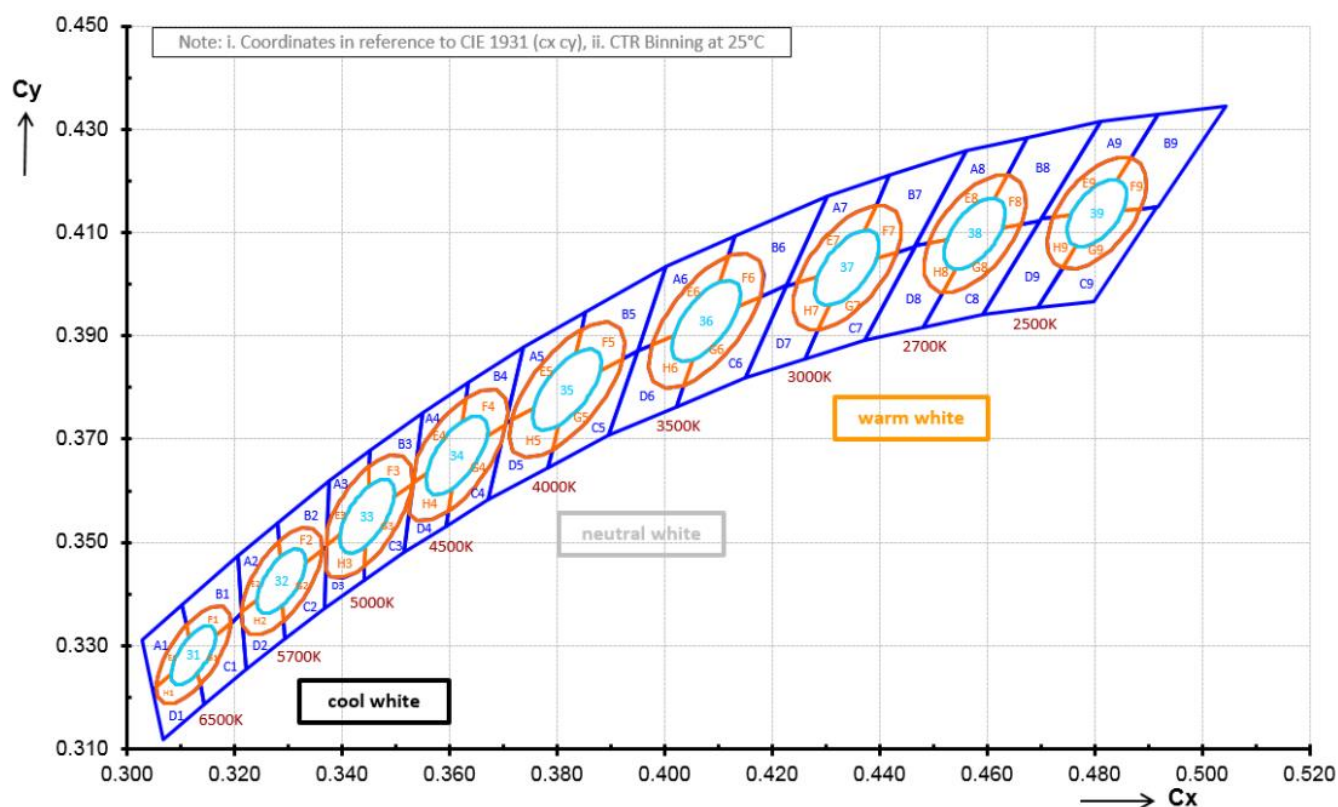


Рисунок 1.3 – Визуализация шагов МакАдама в виде четырехугольника

Так как на данном графике шаги МакАдама представлены в виде четырехугольников, то C_x и C_y обозначают координаты их геометрического центра. А, В, С, D, Е, F, G, Н – геометрические маркеры для оценки искажений или цветовых отклонений. Числа 31–39 – идентификаторы цветовых зон в колориметрическом анализе [51].

Расчет отклонения цвета в значениях МакАдама проводится по формуле [2]:

$$n = \frac{\sqrt{(u' - u'_c)^2 + (v' - v'_c)^2}}{0,0011}, \quad (1.14)$$

где n – отклонение цвета рассматриваемого осветительного прибора (ОП) от номинального значения в шагах МакАдама;

u' , v' – координаты цветности рассматриваемого ОП колориметрической системе МКО 1976 года;

u'_c , v'_c – координаты цветности номинальной КЦТ в колориметрической системе МКО 1976 года.

Значения координат цветности номинальной КЦТ приведены в СТО.69159079-01 [2]. Данные значения представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Координаты центров областей цветности допустимых отклонений коррелированной цветовой температуры

Точки координат цветности четырехугольников		Координаты цветности при номинальном значении КЦТ, К					
		3500	4000	4500	5000	5700	6500
Центральная точка	x	0,4078	0,3818	0,3613	0,3446	0,3287	0,3123
	y	0,3930	0,3797	0,3670	0,3551	0,3425	0,3283

1.3.3 Модель Беляевой-Матвеева

Модель Беляевой-Матвеева – это специализированная метрика цветовых различий, разработанная для точного соответствия требованиям российских промышленных стандартов, применяемых в текстильной и лакокрасочной отраслях, где критична визуальная согласованность цветов.

Модель разработана в 1970-х годах в СССР как ответ на потребности промышленности в точных методах оценки цветовых различий. В этот период активно развивались текстильная и лакокрасочная отрасли, существующие метрики (CIELAB 1976) не учитывали специфику отечественных материалов.

Разработчиками данной модели являются Беляева Лидия Петровна и Матвеев Алексей Сергеевич [63, 64].

Этапы создания:

- 1) 1972-1975: Экспериментальные исследования восприятия цветовых различий на различных материалах.
- 2) 1976: Анализ недостатков CIELAB для отечественной промышленности.
- 3) 1978: Первая публикация метода с адаптивными коэффициентами.
- 4) 1980-е: Внедрение в отраслевые стандарты [65].

Особенности модели заключаются в адаптивных коэффициентах. Особенности позволяют настраивать модель под разные материалы, а также

учитывают следующие коэффициенты: k_L - коэффициент светлоты; k_C - коэффициент насыщенности; k_H - коэффициент чувствительности к тону.

Основные расчетные формулы.

Расчет хроматических параметров [58]:

1. Светлота

$$\Delta L^* = L_2^* - L_1^*, \quad (1.17)$$

где L_1, L_2 - координаты светлоты для цвета 1 и цвета 2 в пространстве CIELAB.

2. Насыщенность (C^*) для каждого цвета

$$C_1^* = \sqrt{a_1^{*2} + b_1^{*2}}, \quad (1.18)$$

$$C_2^* = \sqrt{a_2^{*2} + b_2^{*2}}, \quad (1.19)$$

$$\Delta C^* = C_2^* - C_1^*, \quad (1.20)$$

где a_1, b_1 - это цветоразностные координаты первого сравниваемого цвета в пространстве CIELAB;

a_2, b_2 - это цветоразностные координаты второго сравниваемого цвета в том же пространстве.

3. Цветовой тон (h) и разность тона (ΔH^*)

$$h_1 = \arctan 2(b_1^*, a_1^*) \quad (1.21)$$

$$h_2 = \arctan 2(b_2^*, a_2^*) \quad , \quad (1.22)$$

$$\Delta h = h_2 - h_1, \quad (1.23)$$

$$\Delta H^* = 2\sqrt{C_1^* C_2^*} \sin\left(\frac{\Delta h}{2}\right). \quad (1.24)$$

4. Итоговая формула ΔE_{BM}

$$\Delta E_{BM} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{k_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*}{k_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*}{k_H}\right)^2}, \quad (1.25)$$

где k_L - коэффициент светлоты;

k_C – коэффициент насыщенности;

k_H – коэффициент чувствительности к тону.

В таблице 1.4 представлена интерпретация результатов восприятия по модели Беляевой-Матвеева.

Таблица 1.4 – Интерпретация результатов по модели Беляевой-Матвеева

ΔE_{BM}	Визуальное восприятие	Рекомендации
< 1.5	Неразлично	Соответствует ГОСТ
1.5–3.0	Заметно при сравнении	Допустимо для текстиля
> 3.0	Явное различие	Требуется коррекция

Преимущества модели заключаются в следующем: данная модель оптимизирована под российские ГОСТ, имеет гибкость (настройка коэффициентов под материалы), а также лучше CIELAB для текстиля и красок. Недостаток модели: неприменима для оценки допустимых отклонений источников света.

Модель Беляевой-Матвеевой остаётся ключевым инструментом в российской промышленности, обеспечивая точный контроль цветовых отклонений для специфичных материалов в текстильной и лакокрасочной промышленности [66].

1.3.4 Модель CIEDE2000

Формула цветового отличия, цветоразность или цветовое расстояние (расстояние между цветами) – математическое представление, позволяющее численно выразить различие между двумя цветами в колориметрии.

Одной из таких формул является модель CIEDE2000. CIEDE2000 – это формула цветового различия, рекомендованная CIE в 2001 году. Существует усовершенствованная версия цветового пространства CIELAB, которая, будучи проверенной на множестве экспериментов с реальными наблюдателями, показывает самую высокую точность в моделировании того, как люди

воспринимают разницу между цветами. Предшественниками являются CIELAB (1976) и CIE94 [46].

Предпосылками к созданию модели CIEDE2000 являлись: неравномерность цветового пространства CIELAB (особенно в синей и нейтральной областях), несоответствие визуальному восприятию при малых и средних отклонениях, а также потребность промышленности в более точной метрике. Создателями модели являются Гаурав Шарма, Чангджун Ли и М.Р. Луо [67].

Основные расчетные формулы [58].

1. Расчет вспомогательных величин

1.1 Средняя светлота

$$\overline{L}^* = \frac{L_1^* + L_2^*}{2} \quad (1.26)$$

где L_1, L_2 – координаты светлоты для цвета 1 и цвета 2 в пространстве CIELAB.

1.2. Яркость (C^*) и тон (h) для каждого цвета:

$$C_1^* = \sqrt{a_1^{*2} + b_1^{*2}} \quad h_1 = \arctan 2(b_1^*, a_1^*), \quad (1.27)$$

$$C_2^* = \sqrt{a_2^{*2} + b_2^{*2}} \quad h_2 = \arctan 2(b_2^*, a_2^*), \quad (1.28)$$

где a_1, b_1, a_2, b_2 – координаты цветности (a и b) для цвета 1 и цвета 2 в CIELAB.

a^* – положение на оси красно-зелёного, b^* – на оси жёлто-синего.

$\arctan 2$ – арктангенс с учетом квадранта.

1.3. Средняя насыщенность:

$$\overline{C}^* = \frac{C_1^* + C_2^*}{2}. \quad (1.29)$$

1.4. Поправочный коэффициент G :

$$G = 0,5 \left(1 - \sqrt{\frac{\overline{C}^{*7}}{\overline{C}^{*7} + 25^7}} \right). \quad (1.30)$$

1.5. Скорректированные a^* :

$$a_1' = a_1^* (1 + G) \quad a_2' = a_2^* (1 + G). \quad (1.31)$$

1.6. Обновленные C^* и h :

$$C_1' = \sqrt{a_1'^2 + b_1'^2} \quad h_1' = \arctan 2(b_1^*, a_1'), \quad (1.32)$$

$$C_2' = \sqrt{a_2'^2 + b_2'^2} \quad h_2' = \arctan 2(b_2^*, a_2'). \quad (1.33)$$

1.7. Средний тон

$$\bar{h}' = \begin{cases} \frac{h_1' + h_2'}{2} \rightarrow \text{если } |h_1' - h_2'| \leq 180^\circ \\ \frac{h_1' + h_2' + 360^\circ}{2} \rightarrow \text{если } |h_1' - h_2'| \geq 180^\circ \end{cases}. \quad (1.34)$$

2. Расчет разностей.

2.1. Разность светлоты:

$$\Delta L' = L_2^* - L_1^*. \quad (1.35)$$

2.2. Разность насыщенности:

$$\Delta C' = C_2' - C_1'. \quad (1.36)$$

2.3. Разность тона:

$$\Delta h' = 2\sqrt{C_1' C_2'} \sin\left(\frac{h_2' - h_1'}{2}\right). \quad (1.37)$$

2.4. Взвешенные коэффициенты:

$$S_L = 1 + \frac{0,015(\bar{L}' - 50)^2}{\sqrt{20 + (\bar{L}' - 50)^2}}, \quad (1.38)$$

$$S_C = 1 + 0,045\bar{C}', \quad (1.39)$$

$$T = 1 - 0,17\cos(\bar{h}' - 30^\circ) + 0,24\cos(2\bar{h}') + 0,32\cos(3\bar{h}' + 6^\circ) - 0,20\cos(4\bar{h}' - 63^\circ), \quad (1.40)$$

$$S_H = 1 + 0,015\bar{C}'T, \quad (1.41)$$

$$R_T = -2\sqrt{\frac{\bar{C}'^7}{\bar{C}'^7 + 25^7}} \sin\left(60^\circ \times e^{-\left(\frac{\bar{h}' - 275^\circ}{25}\right)^2}\right). \quad (1.42)$$

где S_L – корректирующая функция для светлоты;

S_C – корректирующая функция для насыщенности;

S_H – корректирующая функция для тона;

T – эмпирический корректирующий фактор тона;

R_T – функция вращения

Итоговый расчет ΔE_{00}

$$\Delta E_{00} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h'}{k_H S_H}\right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)^2 \left(\frac{\Delta h'}{k_H S_H}\right)^2}, \quad (1.43)$$

где k_L, k_C, k_H — весовые коэффициенты (обычно 1.0).

В таблице 1.5 приведена интерпретация результатов по модели CIEDE2000.

Таблица 1.5 – Интерпретация результатов по модели CIEDE2000

ΔE_{00}	Визуальное восприятие
< 0,5	Неразлично
0,5–1,5	Заметно при сравнении
1,5–3,0	Видно невооружённым глазом
> 5,0	Явное отличие

В таблице 1.6 приведены области применения цветовой модели CIEDE2000 [40,53].

Таблица 1.6 – Области применения модели

Отрасль	Примеры использования	Преимущества перед CIELAB
Полиграфия	Контроль цветопередачи при печати (ISO 12647-2)	Высокая точность для телесных тонов (оттенки кожи)
Текстиль	Оценка партий тканей (особенно темных и насыщенных цветов)	Учет метамеризма (оптический эффект, при котором два цвета кажутся одинаковыми при одном источнике света, но выглядят по-разному при другом)
Автопром	Контроль цвета кузовных деталей (DIN 6175-2)	Точность в серых и металлизированных покрытиях
Пластмассы	Подбор цветов для потребительских товаров	Снижение брака при визуальной приемке
Дизайн	Создание гармоничных цветовых схем	Соответствие восприятию при разных освещениях

CIEDE2000 остаётся наиболее точной метрикой для промышленного контроля цвета только при условии, что измерения и конечная оценка происходят при одном, строго определённом источнике света (дневном), и задача сводится к оценке малых различий в стандартных условиях. Однако эта формула не учитывает явление метамерии и не является универсальным решением для задач, где критично соответствие цветов при другом или нескольких источниках освещения. В таких случаях необходим переход к спектральной колориметрии с расчётом индекса метамерии, а ключевым этапом становится корректный выбор осветителя для измерений, соответствующего реальным условиям восприятия продукта.

1.3.5 Сравнение цветовых моделей

Для определения модели оценки цветовых различий в рамках данного исследования требуется провести сравнительный анализ трёх рассмотренных метрик (МакАдама, Беляевой-Матвеева и CIEDE2000) с последующим обоснованным выбором наиболее подходящей модели. В таблице 1.7 приведено сравнение моделей по ключевым характеристикам. В таблице 1.8 приведено сравнение возможностей моделей [58, 63, 67].

Таблица 1.7 – Сравнение по ключевым характеристикам

Критерий	Модель МакАдама	Модель Беляевой-Матвеева	CIEDE2000
Тип модели	Визуальная (эллипсы различимости)	Промышленная метрика (ΔE_{BM})	Усовершенствованная метрика (ΔE_{00})
Основа	Экспериментальные данные (1940-е)	Адаптация CIELAB под ГОСТ Р 71216 – 2024	Модернизация CIELAB (CIE, 2001)
Учёт восприятия	Эллипсы в ху-пространстве	Коэффициенты k_L , k_C , k_H	Полные поправки на тон, насыщенность, светлоту
Применение	Оценка допустимых отклонений	Текстиль, лакокрасочные материалы	Полиграфия, промышленность, дизайн

Таблица 1.8 – Сравнение возможностей

Параметр	МакАдам	Беляева-Матвеев	CIEDE2000
Равномерность пространства	Низкая (эллипсы разного размера)	Средняя (корректируется коэффициентами)	Высокая (оптимизирована CIE)
Учёт яркости	Нет	Да (ΔL^*)	Да (сложные поправки для L^*)
Чувствительность к тону	Нет	Высокая ($k_H=1,5$)	Очень высокая (поправки ΔH)
Стандартизация	CIE 1931	ГОСТ Р 71216 – 2024	CIE 142:2001 (международная)
Сложность расчёта	Простая	Средняя	Высокая (нелинейные поправки)

Вышеуказанные модели применяются в различных отраслях. Модель МакАдама применяется для оценки допустимых отклонений источников света. Модель Беляевой-Матвеева в российской промышленности (текстиль, краски по ГОСТ Р 71216 – 2024). Модель CIEDE2000 применяется для международных проектов (полиграфия, дизайн), а также, когда требуется максимальная точность соответствия восприятию. В таблице 1.9 представлены преимущества и недостатки моделей [68].

Таблица 1.9 – Преимущества и недостатки

Модель	Преимущества	Недостатки
Эллипсы МакАдама	Простота визуализации	Не учитывает яркость, неравномерность пространства (модель использует линейные метрики в цветовом пространстве CIE 1931 (xu), которое неравномерно с точки зрения восприятия человека)
Модель Беляевой-Матвеева	Оптимизирована под российские стандарты	Ограничена специфичными отраслями (лакокрасочная промышленность)

Продолжение таблицы 1.9

Модель	Преимущества	Недостатки
CIEDE2000	Высокая точность, международный стандарт	Сложность расчётов, нелинейность и неинтуитивность, ограниченная точность в крайних условиях

Таким образом, для светотехнических применений применима модель МакАдама, основанная на эллипсах цветовых различий, что обусловлено соответствием визуальному восприятию точечных источников света, возможностью наглядного представления зон допустимых отклонений, соответствием международным стандартам, таким как CIE 015:2018, IEC 60081 и СТО.69159079-05-2020 [69, 70].

Для диссертационного исследования наиболее подходящей является модель МакАдама, что подтверждается следующими дополнительными преимуществами:

1. Модель использует координаты цветности (u', v'), что соответствует стандартным характеристикам колориметрической системы CIE 1976 [69].
2. Позволяет оценивать допуски цветности белого света, цветовые отклонения в пределах эллипсов, отклонение по цветовым группам.

Выбор модели МакАдама позволяет сформулировать требования к допустимым цветовым отклонениям. Однако для того, чтобы спроектировать светодиодную систему, реальные параметры которой укладываются в задаваемые моделью допуски (эллипсы), необходимо детально проанализировать конструктивные особенности и спектральные характеристики самих оптических приборов, таких как светодиод и светодиодный источник света.

1.4 Анализ конструкции и характеристик оптических приборов

Теоретический анализ цветоразличения, проведённый в рамках модели МакАдама, позволяет определить верхнюю границу допустимых цветовых отклонений для источников света. В свою очередь, инженерная задача заключается

в проектировании светодиодной системы, реальные характеристики которой не выходят за пределы указанной границы. Решение данной задачи предполагает последовательное рассмотрение следующих пунктов:

- 1) типы светодиодных кристаллов, обуславливающие первичный спектр излучения;
- 2) конструктивные особенности светодиода и светодиодного источника света, определяющие однородность цветового поля;
- 3) спектральные характеристики, среди которых ключевое значение имеет коррелированная цветовая температура (КЦТ) как интегральный показатель цветности.

1.4.1 Типы светодиодных кристаллов

Спектральные характеристики светодиодных кристаллов определяются типом полупроводникового материала и, соответственно, шириной его запрещённой зоны. В зависимости от целевого диапазона излучения и области применения выделяют три основные группы соединений: нитриды элементов III группы (III-Nitride), фосфиды и арсениды (III-Phosphide / III-Arsenide), а также соединения элементов II и VI групп (II-VI) [71]. Ниже приведена их краткая характеристика.

Классификация кристаллов по типу материалов и областям применения:

1. Нитриды элементов III группы – для коротких длин волн [72].

Это семейство, к которому относится GaN. Ключевое преимущество – широкая регулируемая прямая запрещенная зона.

1.1 InGaN (Нитрид индия-галлия): основа синих, зеленых и фиолетовых светодиодов и лазеров. Изменяя соотношение индия относительно галлия можно сдвигать длину волны (при увеличении индия – 530 нм и выше, при уменьшении – 384 нм и ниже) [73].

1.2 AlGaN (Нитрид алюминия-галлия): используется для УФ-светодиодов, а также как барьерный слой в гетероструктурах для точного удержания носителей. Часто используется в сочетании с GaN [74].

1.3 AlInGaN (Нитрид алюминия-индия-галлия): четверной сплав для еще более точной настройки параметров, например, в лазерных диодах или глубоко-УФ приборах [75].

2. Фосфиды и Арсениды элементов III группы – для длинных волн видимого и ИК-диапазона.

2.1 AlGaInP (Фосфид алюминия-галлия-индия): используется для желтых, оранжевых, красных и темно-красных светодиодов высокой яркости. Исторически именно он вытеснил GaAsP и GaP. Прямоzonный в этом диапазоне, что обеспечивает высокую эффективность [76].

2.2 GaAs (Арсенид галлия): Основа для ИК-светодиодов (например, в пультах ДУ), высокоскоростной электроники и как подложка для роста других структур (AlGaInP). [77]

2.3 GaP (Фосфид галлия): раньше использовался для зеленых и желтых светодиодов низкой эффективности (непрямоzonный). Сейчас чаще используется как подложка или для пассивирующих слоев [78].

3. Соединения элементов II и VI группы — для зеленого и синего (исторически) [79].

3.1 ZnSe (Селенид цинка): В 90-е годы конкурировал с GaN за создание синих и зеленых светодиодов и лазеров. Проиграл из-за проблем со стабильностью и сроком службы.

3.2 ZnCdSe / ZnSSe: Квантовые ямы на основе этих материалов также исследовались для зелено-голубого диапазона [80].

Области применения кристаллов приведены в таблице 1.10.

Таблица 1.10 – Области применения кристаллов светодиодов

Структура	Диапазон длин волн	Применение
InGaN/GaN (нитриды)	УФ (365 нм), Синий (450 нм), Зеленый (530 нм)	Основа белых СИД (синий чип), синие лазеры (Blu-ray), дисплеи, УФ-стерилизация.
AlGaInP (фосфиды)	Желтый (590 нм), Оранжевый, Красный (650 нм)	Светосигнальное оборудование, наружные экраны, красные/желтые индикаторы, подсветка.
GaAs (арсениды)	Инфракрасный (ИК) (~850-940 нм)	Пульты ДУ, ИК-связь, датчики.

В качестве объекта исследования в настоящей работе выбраны светоизлучающие гетероструктуры на основе системы GaN/InGaN. Данный выбор обусловлен тем, что в современной технологии твердотельного освещения люминофорные белые светодиоды, основанные на комбинации синего InGaN-излучателя и желто-зеленого с добавлением красного люминофоров, являются доминирующим и наиболее эффективным решением для генерации высококачественного белого света. Таким образом, GaN/InGaN-структуры выступают единственным коммерчески успешным и физически оптимальным источником первичного излучения для массового производства белых светодиодов общего освещения, что определяет их фундаментальную научную и практическую значимость.

1.4.2 Спектральные характеристики

Светоизлучающие диоды включают в себя полупроводниковый кристалл, контакты для электрического подключения, соединительные проводники для подсоединения контактов к кристаллу, теплоотвод и корпус [81].

Комбинирование синего (чаще) или ультрафиолетового (реже) полупроводникового излучателя и люминофорного порошка позволяет изготовить

источник белого света [82]. Самая распространенная конструкция такого светодиода содержит синий полупроводниковый кристалл нитрида галлия, модифицированного индием (InGaN) и люминофор с максимумом переизлучения в области жёлтого цвета – иттрий-алюминиевый гранат, легированный трёхвалентным церием (YAG). Спектральные характеристики светодиода формируются в результате взаимодействия исходного излучения кристалла с люминофорным слоем. При этом наблюдаются два основных процесса: частичное рассеяние первичного излучения через люминофорный слой и его частичное поглощение с последующим преобразованием в более длинноволновую область спектра. В результате переизлучения люминофора формируется широкополосная спектральная составляющая в зелено-красном диапазоне, однако в результирующем спектре сохраняется выраженный минимум в зелёно-синезелёной области (480-520 нм), что обусловлено особенностями энергетических переходов в используемой люминофорной системе (рисунок 1.4) [18].

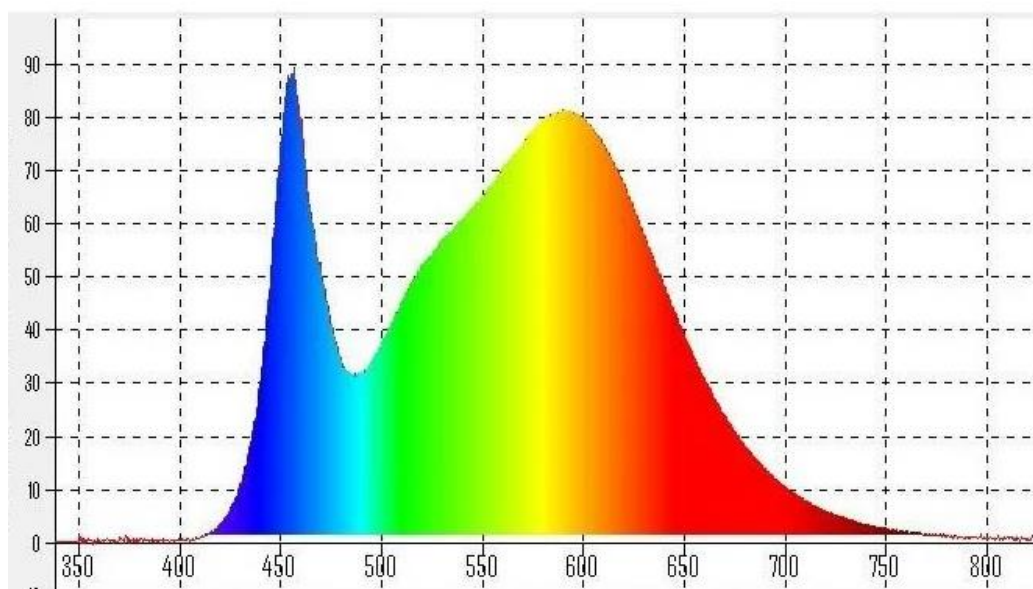


Рисунок 1.4 – Спектр белого светодиода

На рисунке 1.4 по оси x расположена длина волны излучения (нм), по оси y – относительная спектральная плотность мощности излучения светодиода.

В зависимости от состава люминофора, выпускаются светодиоды с разной цветовой температурой в диапазоне значений 2200-6500 К.

1.4.3 Коррелированная цветовая температура

Коррелированная цветовая температура объекта (КЦТ) – это такая температура излучателя Планка (черного тела), имеющего координаты цветности, наиболее близкие к координатам цветности, рассматриваемого объекта. Цветовая температура (спектрофотометрическая или колориметрическая температура) — температура излучателя Планка (черного тела), при которой его излучение имеет ту же цветность, что и излучение рассматриваемого объекта [7].

В связи с тем, что цвет объекта зависит не только от его собственных спектральных свойств, но и от характера освещения, искусственное освещение регламентируется согласно СП 52.13330.2016 прежде всего по цветовой температуре [34].

Различают следующие виды источников освещения по коррелированной цветовой температуре:

- теплые – от 2200 К до 3500 К (включительно);
- нейтральные – от 3500 К до 5000 К (включительно);
- холодные – от 5000 до 6500 К (включительно).

На основании нормативной документации [83] определения координат цветности и КЦТ предусмотрено измерение, проводимое только вдоль оптической оси осветительного прибора [84]. Такие измерения не дают информации о пространственной неоднородности распределения КЦТ.

В связи с этим ставится задача разработки метода для оценки однородности пространственного распределения коррелированной цветовой температуры оптического излучения светодиода на основе шагов МакАдама [9].

1.4.4 Конструкция светодиода

Светодиод имеет несколько основных элементов, каждый из которых выполняет важную, зачастую не одну функцию [9-11]:

1. Светодиодный кристалл. Полупроводниковый материал, используемый в составе светодиодов, кроме способности излучать свет, имеет оптическую прозрачность, электрическую проводимость (для снижения активных потерь при прохождении тока) [12].

2. Корпус – это посадочное место для кристалла. Монтаж кристаллов осуществляется с помощью токопроводящих клеев или диэлектрических эпоксидных составов (в зависимости от типа применяемого кристалла) [85-87].

3. Клей или эвтектический сплав. Способ крепления светодиодного кристалла в корпусе предполагает обеспечивать прочность соединения, равномерный электрический контакт и теплопроводность. Кроме этого, должен иметь отражающую способность и выдерживать длительное воздействие температуры [88].

4. Защитный компаунд, защищающий структуру светодиода от коррозии и воздействия окружающей среды, и линзу (в случае необходимости фокусирования светового потока) [89].

5. Токоподводящие элементы. Проводники или токоподводящие нити подводят ток к верхней, направленной наружу, стороне полупроводникового чипа. Такой проводник и способ его крепления обеспечивают хороший контакт и низкое активное сопротивление току, а также не препятствуют выходу света [90, 91].

6. Люминофор. Кроме широкого спектра переизлучения, активному материалу и веществу необходимо обеспечивать минимальный уровень безизлучательного поглощения. Это необходимо, чтобы эффективно передавать энергию от мест её поглощения к излучающим центрам. Эффективность передачи энергии зависит от природы и концентрации примесей (активаторов люминесценции), способных поглотившую энергию возбуждения выделять в виде квантов света, а также от природы и концентрации примесей (гасителей или тушителей люминесценции) и структурных дефектов, препятствующих передаче энергии излучающим центрам. Особое внимание уделяется температурной стойкости и стабильности при длительной работе. Способ нанесения люминофора

во многом определяет цветовые характеристики, в том числе пространственные характеристики цвета и яркости [92, 93].

1.4.5 Конструкция светодиодного источника света

На протяжённой узкой подложке, которая выполняет функцию теплорассеивающего основания, располагаются от 18 до 28 Surface Mount Device (SMD) кристаллов. Подложка может быть выполнена из алюминия, сапфира, стекла или керамики [96,97]. Конструкция светодиодного источника света представлена на рисунке 1.5, где обозначено: 1 – металлический вывод, 2 – подложка из теплопроводящего материала с нанесенным клеевым слоем, 3 – излучающие кристаллы, 4 – соединительная проволока, 5 – люминофорная композиция.

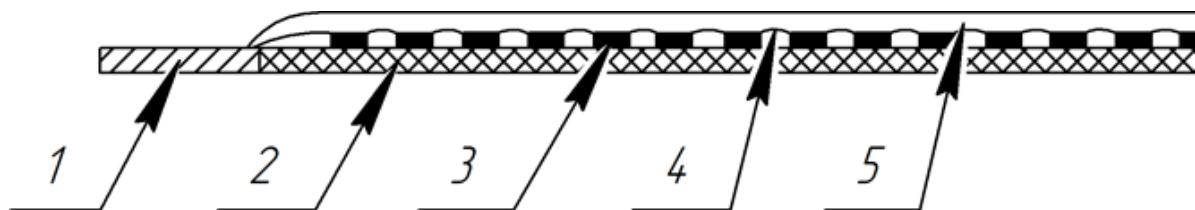


Рисунок 1.5 – Конструкция светодиодного источника

Таким образом, источник света представляет собой не точечный, а линейный объект, состоящий из дискретных излучателей. Это делает необходимым контроль не только интегральных, но и локальных фотометрических и колориметрических параметров.

В соответствии с этим ставится задача применения метода для оценки однородности пространственного распределения цветовых параметров оптического излучения к светодиодному источнику света на основе матрицы GaN/InGaN кристаллов.

1.4.6 Процесс изготовления светодиодов и светодиодных источников света

Производство светодиодов – многоступенчатый процесс, включающий эпитаксиальный рост полупроводниковых структур, планарную обработку, сборку и тестирование.

1) Эпитаксиальный рост полупроводниковых структур. Цель: формирование активных слоёв, генерирующих свет при рекомбинации электронов и дырок.

Выбор материала подложки. Для GaN/InGaN-кристаллов (синий, УФ-диапазон): сапфир (Al_2O_3), карбид кремния (SiC), кремний (Si).

Методы эпитаксиального роста. MOCVD (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition) – основной метод для массового производства: газы-предшественники (триметилгаллий TMGa , триметилиндий TMIIn , аммиак NH_3) подаются в реактор, на подложке осаждаются тонкие слои (GaN, InGaN, AlGaN) с точным контролем состава и толщины [98].

Формирование эпитаксиальной гетероструктуры. N-область (n-GaN) легируется кремнием (Si), который, замещая атомы галлия, создает избыточную электронную проводимость. Активная область представляет собой систему квантовых ям – чередующихся слоев InGaN/GaN (для синих и зеленых СИД) или AlInGaP (для красных и желтых СИД). Толщина каждого слоя в активной области составляет 2–10 нм в зависимости от типа структуры и требуемой длины волны излучения. P-область (p-GaN) легируется магнием (Mg), что обеспечивает дырочную проводимость [98].

2) Планарная обработка (изготовление кристаллов).

На поверхность эпитаксиальной структуры наносится фоторезист, который затем экспонируется через фотомаску. После проявления в экспонированных областях фоторезист удаляется, а в неэкспонированных – сохраняется (для позитивного резиста). Далее проводится травление (сухое/плазмохимическое или влажное) для формирования мезоструктур (изоляционных канавок, ограничивающих область свечения). Затем формируются контактные площадки: n-

контакт к n-области (со стороны подложки или после вскрытия контактного окна) и p-контакт к p-слою на верхней стороне структуры.

Металлизация (формирование электродов).

Для n-контакта формируется многослойная металлизация Ti/Al/Ni/Au, где титан обеспечивает адгезию, алюминий – низкое контактное сопротивление, никель служит барьерным слоем, а золото защищает от окисления. Для p-контакта используется Ni/Au или прозрачные проводящие оксиды Transparent Conductive Oxides (TCO), например, оксид индия-олова Indium Tin Oxide (ITO), позволяющие равномерно инжектировать носители заряда через верхний излучающий слой. После нанесения металлизации проводится быстрый термический отжиг для формирования омического контакта [99].

Разделение кристаллов.

Разделение эпитаксиальной пластины на отдельные кристаллы выполняется методом лазерной резки (скрайбированием) или алмазным пилением. Лазерная резка используется для сапфировых подложек, так как снижает механические повреждения и повышает прочность кристаллов. Типовые размеры получаемых кристаллов лежат в диапазоне от 200×200 мкм (для маломощных индикаторных СИД) до 1×1 мм (для мощных осветительных приборов).

3) Сборка светодиодов. Это процесс монтажа кристалла в корпус, который обеспечивает электрическое соединение, механическую защиту и теплоотвод.

Монтаж кристалла. Кристалл извлекается вакуумным пинцетом и устанавливается на основание корпуса. Для фиксации используется токопроводящий эпоксидный клей (например, с серебряным наполнителем), который одновременно обеспечивает механическое крепление и электрический контакт нижней (n-) области кристалла с первым выводом корпуса.

Проводной монтаж. Верхний p-контакт кристалла соединяется золотой или алюминиевой проволокой диаметром 15–30 мкм со вторым выводом корпуса. Соединение выполняется методом термозвуковой или ультразвуковой сварки [99].

Приготовление люминофорной композиции.

Люминофорная смесь. Для получения белого света подбирают один или несколько типов люминофоров. Например, желто-зеленый YAG:Ce^{3+} (иттрий-алюминиевый гранат, активированный церием) в комбинации с синим кристаллом дает «холодный» белый свет. Добавление нитридного или оксонитридного красного люминофора (например, $(\text{Ca,Si})\text{AlSiN}_3\text{:Eu}^{2+}$) позволяет повысить индекс цветопередачи Color Rendering Index (CRI) и насыщенность красного канала (R9).

Рассеивающая среда. Порошок люминофора тщательно смешивают с оптически прозрачным полимером, в качестве которого обычно используется силиконовый компаунд (термостойкий, устойчивый к пожелтению под действием УФ-излучения и высоких температур).

Контроль качества. Полученную смесь дегазируют в вакууме (для удаления пузырьков воздуха, которые вызывают рассеяние света и ухудшают однородность свечения) и гомогенизируют для предотвращения оседания тяжелых частиц люминофора [100].

Нанесение люминофорной композиции. Нанесение люминофора – технологический этап, определяющий цветовые характеристики (координаты цветности, КЦТ) и их пространственную однородность.

Основные методы нанесения люминофорной композиции на основе компаунда с люминофором:

а) Прямое покрытие кристалла.

Капля точно дозированной люминофорной смеси наносится непосредственно на кристалл, установленный в корпусе.

Особенность: простота, но толщина слоя над центром и краями кристалла может различаться, что приводит к угловой неоднородности цветности (эффект «желтого ореола»). Измерение чего только по оси [83] не выявляет этого дефекта.

б) Удаленное расположение.

Люминофорная композиция наносится не на кристалл, а на внутреннюю поверхность отдельной линзы или пластины, которая затем устанавливается на некотором расстоянии над кристаллом. Преимущество: меньший нагрев люминофора, более равномерное угловое распределение цветности, снижение

зависимости цвета от угла наблюдения. Недостаток: более сложная конструкция и увеличенные габариты.

в) Прецизионное литьё под давлением.

Корпус с кристаллом помещается в пресс-форму, куда под давлением заливается смесь компаунда с люминофором, формирующая одновременно линзу и люминофорный слой. Особенность: высокая воспроизводимость, возможность точного контроля геометрии, хорошая защита кристалла. Широко используется в массовом производстве мощных SMD-светодиодов.

Полимеризация (отверждение): светодиоды с нанесенной люминофорной композицией помещают в печь для термической полимеризации (отверждения) компаунда.

1.4.7 Люминофорная композиция

Люминофорная композиция состоит из связующего (компаунд) и порошка люминофора.

Компаунды делятся на три вида: эпоксидные, полиуретановые и силиконовые. Полиуретановые компаунды обычно применяются благодаря своей эластичности. Эпоксидные компаунды, в целом, являются более твердыми материалами, обладая по сравнению с полиуретановыми компаундами стойкостью как к химическим веществам, так и к механическим воздействиям. Силиконовые компаунды обычно применяются в устройствах, подверженных воздействию высоких температур, и обеспечивают защиту в тяжёлых условиях эксплуатации (перепад температур).

Для защитных компаундов светодиодных изделий установлен ряд требований. Базовыми параметрами являются оптическая прозрачность (для компаундов, контактирующих с кристаллом) и теплопроводность (для теплоотводящих материалов). Расширение области применения светодиодного оборудования привело к ужесточению дополнительных критериев. В частности, возросла потребность в стойкости компаунда к УФ-облучению и фотодеградаци

(изменению окраски), а также в способности сохранять коррелированную цветовую температуру светодиода на стабильном уровне [101].

Люминофоры – это конденсированные вещества (кристаллические, аморфные или полимерные), в которых под действием внешнего излучения или поля происходит генерация электронно-дырочных пар или возбуждение центров свечения с последующей излучательной рекомбинацией, наблюдаемой как люминесценция. По способу возбуждения различают фотолюминофоры, рентгенолюминофоры, радиолюминофоры, катодолюминофоры, электролюминофоры [100]. Некоторые люминофоры бывают смешанных типов возбуждения, например, фото-, катодо- и электролюминофор $\text{ZnS} \cdot \text{Cu}$ [102]. По химической структуре различают органические люминофоры – органолюминофоры, и неорганические – фосфоры [103]. Фосфоры, имеющие кристаллическую структуру, называют кристаллофосфорами [104].

Свечение люминофора обуславливается как свойствами основного вещества, так и наличием активатора (примеси). Активатор создает в основном веществе (основании) центры свечения. Наименование активированных люминофоров складывается из имени основания и активатора, например: $\text{ZnS} \cdot \text{Cu,Co}$ означает люминофор ZnS , активированный медью и кобальтом. Если основание смешанное, то перечисляют сначала названия оснований, а затем активаторов, например, $\text{ZnS, CdS} \cdot \text{Cu,Co}$ [105].

Энергия, возбуждающая люминофор, может поглощаться как люминесцентными центрами (активаторное или примесное поглощение), так и основой люминофора (фундаментальное поглощение). В первом случае, поглощение сопровождается либо переходом электронов внутри электронной оболочки на более высокие энергетические уровни, либо полным отрывом электрона от активатора (образуется «дырка»). Во втором случае, при поглощении энергии основой, в основном веществе образуются дырки и электроны. Излучение происходит в результате возвращения электронов на более низкие энергетические уровни или при рекомбинации электрона с дыркой [106].

В процессе эксплуатации параметры люминофора со временем ухудшаются.

Это явление (деградация) вызвано физическими и химическими процессами, происходящими как внутри слоя люминофора, так и на его поверхности. Основными причинами деградации являются образование дефектов, приводящих к безызлучательной рекомбинации, и увеличение поглощения света в поврежденном слое люминофора.

Белые светодиоды чаще всего изготавливаются на основе синего кристалла InGaN и желтого люминофора [107-109]. Желтые люминофоры – это модифицированный иттрий-алюминиевый гранат (ИАГ), легированный трехвалентным церием. Спектр люминесценции этого люминофора характеризуется максимумом длины волны, находящимся в диапазоне длин волн 530-560 нм. Длинноволновая часть спектра имеет большую протяженность, чем коротковолновая. Модифицирование люминофора добавками галлия и гадолиния позволяет сдвигать максимум спектра в холодную область (ниже 530 нм, галлий) или в теплую (выше 560 нм, гадолиний) [110].

Люминофор чаще всего наносят непосредственно на кристалл светодиода, который нагревается. С внедрением технологии с изолированным слоем люминофора (удаленный люминофор), влияние температуры на скорость деградации люминофора снижается [111].

Технология удаленного люминофора оказывает существенное влияние на пространственное распределение оптических параметров (световой поток, световая отдача, КЦТ) светодиодных источников света. В отличие от традиционных конструкций, где люминофор наносится непосредственно на кристалл, в данной технологии люминофорный слой располагается на некотором расстоянии от светоизлучающего кристалла. Это приводит к следующим изменениям пространственных характеристик [112].

1. Улучшение однородности цветопередачи – благодаря расстоянию между кристаллом и люминофором снижается локальный перегрев слоя, что минимизирует цветовые отклонения по площади излучающей поверхности.

2. Снижение цветовой неоднородности – в традиционных светодиодах наблюдается зависимость цветовой температуры от угла наблюдения (побочный

эффект неравномерного возбуждения люминофора), тогда как технология удаленного люминофора обеспечивает более стабильное цветовое распределение в пространстве [113,114].

Известные преимущества технологии удаленного люминофора позволяют сформулировать актуальную научно-техническую задачу: разработку новых светодиодных источников света с улучшенным пространственным распределением коррелированной цветовой температуры.

1.4.8 Выбор люминофоров для дальнейшего исследования и разработки метода оценки однородности пространственного распределения цветовых параметров

Широкое использование люминофоров на основе YAG:Ce в белых светодиодах обусловлено уникальным сочетанием химических, оптических и технологических свойств, которые делают его подходящим вариантом для синего светодиодного кристалла [115]. Ион церия Ce^{3+} в кристаллической решетке YAG дает широкую полосу излучения в желто-зеленой области спектра. Это позволяет легко настроить цветовую температуру (КЦТ) от "теплого" до "холодного" белого света, варьируя состав люминофора и толщину его слоя [116].

Размер частиц порошка люминофора является важным параметром, определяющим его функциональные характеристики и конечную эффективность в светодиодах. Он напрямую влияет на ключевые свойства: эффективность люминесценции (квантовый выход), однородность цвета и качество нанесения покрытия. Размер частиц люминофора – ключевой параметр, определяющий эффективность фотолюминесцентного преобразования (поглощения синего излучения кристалла и переизлучения в длинноволновой области). Предпочтительный размер (13–20 мкм) обеспечивает максимальное поглощение возбуждающей энергии и минимальные потери на рассеяние. Неоднородность или несоответствие размеров частиц ведут к снижению яркости, неравномерности

свечения. Соответственно контроль размера частиц является обязательным условием для получения качественных светодиодов [117-119].

Таким образом, выбор люминофора с подходящим распределением частиц по размерам – это первостепенная задача для разработки высококачественных и надежных устройств.

Для проведения исследований имеется пять образцов люминофора с различными распределениями частиц по размерам. Задача заключается в выборе одного образца, на основе анализа влияния размера частиц на его свойства. На рисунке 1.6 представлено относительное распределение частиц люминофора по размерам (гранулометрический состав).

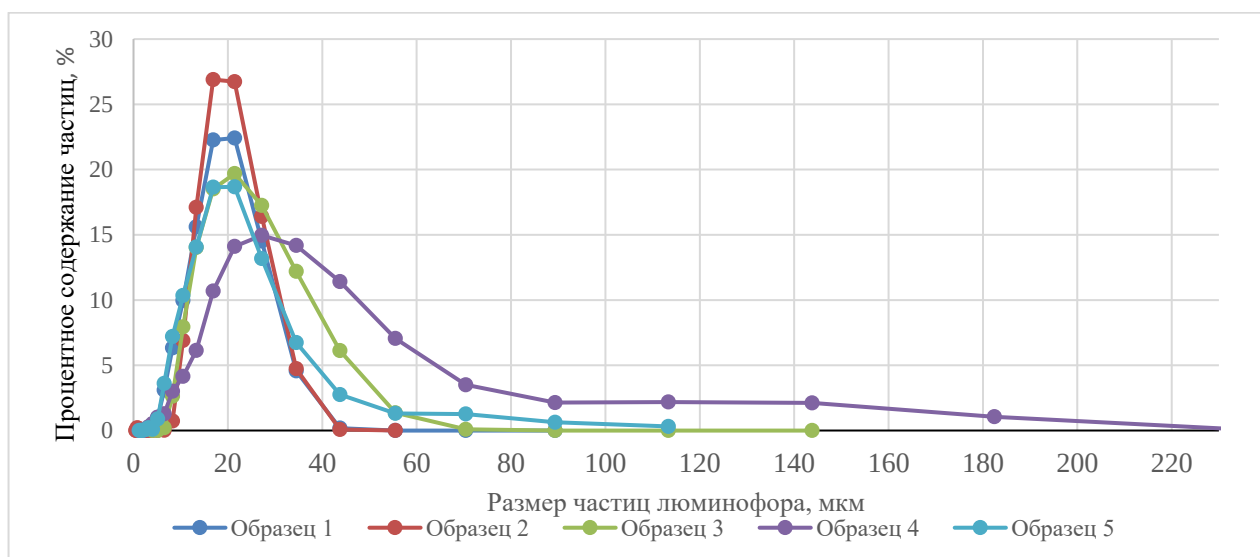


Рисунок 1.6 – Гранулометрический состав люминофоров

Из рисунка 1.6 следует, что два образца (№ 1 и № 2) характеризуются преобладанием частиц размером 13–21 мкм и демонстрируют наименьший разброс значений по сравнению с остальными образцами.

Для подтверждения выбора люминофоров для дальнейших исследований изготовлены макеты светодиодов на основе данных порошков. Измерены световой поток и световая отдача. Результаты измерений представлены в таблице 1.11.

Таблица 1.11 – Результаты измерений

Люминофор	I, мА	U, В	P, Вт	Φ, лм	η, лм/Вт	T _ц , К
Образец 1	80±0,012%	2,73±0,012%	0,218±0,024%	31±10%	144±10,024%	3913±5%
Образец 2	80±0,012%	2,75±0,012%	0,22±0,024%	32±10%	145±10,024%	4478±5%
Образец 3	80±0,012%	2,85±0,012%	0,228±0,024%	27±10%	120±10,024%	3094±5%
Образец 4	80±0,012%	2,83±0,012%	0,226±0,024%	31±10%	139±10,024%	6853±5%
Образец 5	80±0,012%	2,96±0,012%	0,237±0,024%	27±10%	114±10,024%	2591±5%

На основании полученных данных принято решение использовать для дальнейших экспериментов образцы люминофоров под номерами 1 и 2.

1.4.9 Сравнение различных типов диффузатов

Современные технологии производства белых светодиодов (СИД), предъявляют высокие требования к качеству и стабильности люминофорного покрытия. Ключевым элементом конструкции белого светодиода является люминофорная композиция – смесь люминофорного порошка и прозрачного полимерного компаунда, которая наносится непосредственно на светодиодный кристалл или в его ближайшее окружение [120].

Основная задача данной композиции заключается в эффективном преобразовании части коротковолнового излучения синего светодиодного кристалла в желто-зеленое излучение. Результирующее аддитивное смешение преобразованного и непоглощённого синего излучения формирует требуемое белое свечение.

Пространственная цветовая неоднородность выходного излучения, остаётся существенным недостатком подобных источников. Данное явление возникает вследствие комбинации двух факторов: направленного (ламбертовского или косинусного) распределения силы света полупроводникового кристалла и локальных вариаций толщины или плотности люминофорного слоя. Это приводит к отклонениям координат цветности в пространственном распределении,

наблюдаемым как артефакты в виде концентрических цветовых колец (например, жёлтое ореольное кольцо) или локальных хроматических пятен (синее пятно), что значительно ухудшает субъективное восприятие качества света [121].

Для уменьшения неоднородности пространственного распределения цвета в состав люминофорной композиции целенаправленно вводится диффузант – микро- или наноразмерные частицы, оптические свойства которых отличаются от свойств окружающей их среды. Диффузаны, представляющие собой частицы оксидов (например, TiO_2 , Al_2O_3 , SiO_2), выполняют функцию пассивных рассеивателей света. Они не поглощают и не преобразуют фотоны, как люминофор, а многократно переотражают их, эффективно рассеивая как первичное синее излучение чипа, так и вторичное излучение люминофора [122].

Таким образом, добавление диффузанта в люминофорную композицию представляет собой целенаправленный технологический прием, позволяющий управлять светораспределением внутри компаунда [123]. Это позволяет достичь следующих результатов:

1) повышение однородности цвета – устранение локальных цветовых пятен за счет равномерного смешения синего и преобразованного света по всему объему линзы или слоя;

2) улучшение пространственной неравномерности коррелированной цветовой температуры – обеспечение стабильного оттенка белого света при наблюдении под разными углами;

3) снижение потерь на внутреннее поглощение – перенаправление света, который мог бы быть поглощен самим кристаллом или элементами корпуса, что в конечном счете способствует повышению световой отдачи устройства [124].

Далее, рассмотрим примеры диффузантов.

1) Диоксид титана.

Диоксид титана (TiO_2) – это бесцветное твердое кристаллическое вещество. Несмотря на бесцветность, в больших количествах диоксид титана чрезвычайно эффективный белый пигмент, если он хорошо очищен. TiO_2 практически не поглощает никакого падающего света в видимой области спектра. TiO_2 – это

стабильное, нелетучее, нерастворимое в кислотах, щелочах при нормальных условиях вещество. Диоксид титана (TiO_2) устойчив к действию большинства кислот (HCl , H_2SO_4 , HNO_3) и щелочей (NaOH , KOH), а также не вступает в реакцию с токсичными газами (SO_2 , NO_x , H_2S), [125].

Основной функцией диоксида титана (TiO_2) в составе композиционного материала является обеспечение высоких отражающих характеристик, что визуально воспринимается как яркость. Количественная оценка цвета осуществляется в колориметрической системе CIELAB (L^* , a^* , b^*).

На оптические свойства конечного покрытия, помимо химической чистоты TiO_2 , существенное влияние оказывает дисперсность (размер частиц). Частицы TiO_2 размером от 250 нм и более (средне- и крупнодисперсная фракция) обеспечивают максимальную непрозрачность и кроющую способность при содержании в связующем 15–30 масс. %, что является стандартным для большинства лакокрасочных систем.

Кроющая (укрывная) способность — это метрологическая характеристика, указывающая площадь поверхности (в м^2), которую можно покрыть единицей объема (или массы) материала до исчезновения контраста подложки [126]. Данный параметр напрямую определяет минимальную толщину слоя, необходимую для обеспечения визуальной сплошности и отсутствия просвечивания подложки [127].

2) Диффузант ДФ-151.

Представляет собой мелкодисперсный порошок двуокиси кремния белого цвета, с органической обработкой поверхности (аналоги - молотый кварц, аэросил). Не имеет запаха, практически не растворим в воде (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Внешний вид диффузанта ДФ-151

В таблице 1.12 представлены основные характеристики диффузанта [128].

Таблица 1.12 – Основные характеристики диффузанта

Содержание SiO ₂ , %	98-99,5
Размер частиц, мкм	5-8
Насыпная плотность, г/л	130
Показатель преломления	1,45

Добавляется в эпоксидный компаунд в количестве 1-7% в зависимости от толщины полимерного слоя. Применяется: для придания "молочности" (за счет светорассеивающих свойств), увеличения тиксотропности и вязкости компаунда, а также в качестве антиседиментационной добавки [128].

Проведем сравнение рассмотренных типов диффузантов в таблице 1.13.

Таблица 1.13 – Сравнительная таблица характеристик

Параметр	ДФ-151 (SiO ₂)	Диоксид титана (TiO ₂)
Оптические свойства		
Коэффициент преломления	1,5-1,6	2,5-2,7
Собственное поглощение	Низкое	Высокое в синей области спектра
Рассеивающая способность	Высокая	Очень высокая
Физико-химические свойства		
Форма частиц	Идеальные сферы	Неправильная, анизометрическая
Монодисперсность	Высокая	Низкая (полидисперсный)
Фотокаталитическая активность	Отсутствует	Выраженная
Химическая стабильность	Высокая	Средняя
Технологические параметры		
Диспергируемость в силиконе	Отличная	Проблемная (агломерация)
Влияние на надежность	Нейтральное	Деградация силикона
Стабильность суспензии	Высокая	Склонность к седиментации

Анализ преимуществ ДФ-151.

1. Преимущества в оптических характеристиках

Хотя диоксид титана обладает более высоким коэффициентом преломления, что теоретически обеспечивает лучшую рассеивающую способность, ДФ-151

демонстрирует практически нулевое поглощение в видимой области спектра, особенно в синей области (450-470 нм), которая критически важна для синих светодиодов. Это напрямую повышает световую отдачу СИД на 3-7% по сравнению с TiO_2 [129].

2. Преимущества в надежности и стабильности

Ключевым недостатком TiO_2 является его фотокаталитическая активность. Под воздействием высокоэнергетического синего и УФ-излучения TiO_2 генерирует активные формы кислорода, которые вызывают: деградацию силиконового компаунда (пожелтение, помутнение), разрушение поверхностных центров люминофора, снижение светового потока на 15-25% в течение срока службы [130].

ДФ-151 химически инертен и не проявляет фотокаталитических свойств, что обеспечивает стабильность параметров светодиода на протяжении всего срока службы.

3. Технологические преимущества

Сферическая форма и монодисперсность частиц ДФ-151 обеспечивают: предсказуемое и однородное рассеяние света, снижение концентрации для достижения целевых параметров на 20-30%, отсутствие агломерации и простота диспергирования, минимальное внутреннее напряжение в полимерной матрице

На основе проведенного анализа можно уверенно утверждать, что диффузант ДФ-151 является значительно более предпочтительным выбором для люминофорных композиций светодиодов, чем диоксид титана [131].

На основании этого ставятся задачи разработки нового процесса изготовления люминофорной композиции с применением диффузанта для светодиода и для светодиодного источника света на основе кристаллов GaN/InGaN.

1.5 Регрессионный анализ и аппроксимация кривой координат цветности

Современные исследования в области колориметрии и анализа цветовых характеристик требуют применения надежных методов математической

статистики для обработки экспериментальных данных, проверки гипотез и выявления значимых закономерностей.

Основу методологической базы составляют:

1. Дескриптивный статистический анализ

Первичная обработка экспериментальных данных начинается с применения методов описательной статистики. Для характеристики центральной тенденции используются: среднее арифметическое значение, медиана и мода.

Оценка вариативности данных проводится может проводиться с помощью: дисперсии и стандартного отклонения, размаха вариации, межквартильного расстояния.

Визуализация распределений осуществляется посредством: гистограмм, боксплотов (диаграмм "ящик с усами"), графиков рассеяния [132].

2. Проверка статистических гипотез

В зависимости от характера распределения данных применяются: параметрические критерии (t-критерий Стьюдента, дисперсионный анализ, F-тест) – для нормально распределенных данных; непараметрические аналоги (U-критерий Манна-Уитни, критерий Вилкоксона, критерий Краскела-Уоллиса) – при отклонении от нормальности распределения [133].

3. Корреляционный и регрессионный анализ

Исследование взаимосвязей между переменными включает: оценку корреляционной зависимости с использованием коэффициентов Пирсона (для линейных связей) и Спирмена (для ранговых корреляций); построение регрессионных моделей (линейных, множественных) для прогнозирования и анализа влияния факторов [134].

4. Анализ распределений

Проверка соответствия эмпирических распределений теоретическим осуществляется с помощью: критерия Шапиро-Уилка и критерия Колмогорова-Смирнова. При необходимости применяются методы преобразования данных: логарифмическое преобразование, преобразование Бокса-Кокса [135].

5. Многомерные статистические методы

Для анализа сложных взаимосвязей между множеством переменных используются: факторный анализ, кластерный анализ, метод главных компонент (РСА) [136].

6. Байесовские методы

В случаях, требующих учета априорной информации, применяются байесовские оценки вероятностей, байесовские сети доверия [137].

7. Методы машинного обучения

Для решения задач классификации и прогнозирования задействуются: деревья решений, случайные леса, метод опорных векторов [137].

Выбор конкретных методов статистического анализа в каждом случае определяется: типом и шкалой измерений анализируемых переменных, характером распределения данных, количеством наблюдений и переменных, конкретными задачами исследования (описательными, сравнительными или прогностическими).

В рамках настоящего диссертационного исследования метод множественной линейной регрессии выбран в качестве основного аналитического инструмента в силу его принципиального соответствия специфике изучаемых цветовых параметров и решаемых научных задач.

Прежде всего, следует отметить, что анализируемые цветовые модели (CIELAB) и метрики цветовых различий (ΔE) по своей природе представляют собой непрерывные количественные переменные, измеренные в строгих метрических шкалах. Такая характеристика данных идеально соответствует базовым предпосылкам регрессионного анализа.

Современные цветовые пространства, такие как CIELAB или XYZ, обладают принципиально многомерной структурой, где каждый цветовой образ описывается тремя-четырьмя независимыми координатами.

Такой многопараметрический анализ существенно превосходит по информативности традиционные парные корреляции, позволяя выявлять скрытые взаимосвязи и комплексные закономерности.

С практической точки зрения, регрессионные модели вида $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon$ предоставляют уникальные возможности для решения ключевых прикладных задач исследования:

1. Точного прогнозирования изменений цветовых характеристик при варьировании условий наблюдения.
2. Калибровки измерительных систем с учетом множества влияющих факторов.
3. Улучшение алгоритмов цветопередачи и цветовых преобразований.

Важным преимуществом является методологическая гибкость подхода, допускающая включение полиномиальных членов для учета нелинейных эффектов, моделирование взаимодействий между переменными.

Сравнивая с альтернативными подходами машинного обучения, следует подчеркнуть, что регрессионные модели: соответствуют международным метрологическим стандартам, обеспечивают прозрачную интерпретацию результатов, допускают точную оценку погрешностей предсказания, широко приняты в промышленных стандартах цветокоррекции.

Таким образом, множественная линейная регрессия представляет собой аналитический инструмент, сочетающий точность моделирования сложных цветовых зависимостей, прозрачность и физическую интерпретируемость результатов, соответствие строгим метрологическим требованиям, широкие возможности практической реализации в системах обработки цвета.

Указанные преимущества делают данный метод наиболее адекватным выбором для решения комплекса научных задач, поставленных в настоящем диссертационном исследовании.

Учитывая приведенные методологические основания выбора множественной линейной регрессии в качестве основного аналитического инструмента, перейдем к детальному описанию самого метода и особенностей его применения в контексте исследования цветовых характеристик.

Регрессионный анализ – это инструмент для количественного определения значения одной переменной на основании другой [133].

Парная (простая) линейная регрессия даёт правила, определяющие линию регрессии, которая предсказывает наиболее вероятные значения одной переменной на основании другой. Множественная регрессия является расширением простой линейной регрессии. По оси Y располагают переменную, которую необходимо предсказать (зависимую), а по оси X – переменную, на основе которой будет осуществляться предсказание (независимую).

Зависимая переменная – это переменная в регрессии, которую нельзя изменять, её изменение является следствием влияния независимой переменной (переменных). Независимая переменная – это та переменная в регрессии, которую можно изменять.

Коэффициенты регрессии (β) – это количественные показатели, рассчитываемые в ходе регрессионного анализа для каждой независимой переменной. Они показывают величину изменения зависимой переменной при изменении независимой на единицу своего измерения, а также знак (положительный или отрицательный) этого изменения [133, 138].

Модель множественной линейной регрессии предназначена для проверки и изучения связи (объяснения поведения) между одной зависимой переменной (эндогенной) и несколькими независимыми (экзогенными) переменными. Предполагается, что такая связь теоретически может быть описана (специфицирована) линейной зависимостью (функцией) вида:

$$Y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + U, \quad (1.44)$$

где Y -зависимая (объясняемая, эндогенная) переменная-регрессанд, U - случайная составляющая модели, x_j (где $j = 1, 2, \dots, k$) – независимые (объясняющие, экзогенные) переменные-регрессоры.

В данной работе рассматривается классическая модель множественной линейной регрессии. Это означает, что независимые переменные (регрессоры) предполагаются не случайными (детерминированными) величинами.

Модель (1.44) связывает зависимую и независимые переменные в отдельных наблюдениях (реализациях) переменных

$$y_i = \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \cdots + \beta_k x_{ik} + u_i. \quad (1.45)$$

Переменные y и u в уравнении (1.45) являются реализациями случайных величин Y и U . Переменная $x_1 = x_{i1} = 1$ (для всех $i = 1, 2, \dots, n$) и называется вспомогательной переменной для свободного члена. Она вводится для удобства записи уравнений многомерной линейной регрессии. Таким образом, коэффициент регрессии β_1 в уравнениях (1.44), (1.45) является свободным членом, который называется также параметром сдвига [133,138,139].

Для статистической оценки параметров регрессионной модели необходим набор (множество) данных наблюдений зависимой и независимых переменных. Эти данные могут быть пространственными - в этом случае наблюдаются различные объекты, но наблюдения относятся к одному и тому же моменту или периоду времени. Данные могут быть представлены в виде временных рядов наблюдений зависимой (объясняемой) и независимых (объясняющих) переменных – в этом случае наблюдается поведение одного объекта в различные (но одинаковые для всех переменных) моменты времени. Для каждого из этих наблюдений согласно линейной модели, можно записать уравнения

[illegible]

Данную систему уравнений удобно записать в векторно-матричном виде. Для этого необходимо ввести следующие обозначения:

1. Вектор – столбец (столбцовая матрица) наблюдений зависимой переменной (регрессанда):

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}. \quad (1.47)$$

2. Матрица наблюдений независимых переменных (регрессоров):

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \cdots & x_{ik} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix}. \quad (1.48)$$

3. Вектор – столбец коэффициентов (параметров):

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix}. \quad (1.49)$$

4. Вектор - столбец реализаций случайной составляющей в отдельных наблюдениях:

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix}. \quad (1.50)$$

Таким образом, здесь u - вектор-столбец размерности n , элементы которого - наблюдения зависимой переменной (регрессанда); X - матрица размерности $(n \times k)$, ее столбцы содержат наблюдения независимых переменных (регрессоров), i -ый столбец матрицы X (кроме первого) содержит n наблюдений i -го регрессора, первый столбец этой матрицы состоит из единиц; β - вектор-столбец размерности k , его элементы - коэффициенты уравнения регрессии; u - вектор-столбец размерности n , его элементы - реализации случайной составляющей модели в каждом наблюдении.

Для того, чтобы получить аналитическое выражение, которое аппроксимирует координаты цветности, нужно использовать полиномиальное приближение:

$$x(\alpha) \approx \beta_0 + \beta_1 \alpha + \beta_2 \alpha^2 + \beta_3 \alpha^3 + \beta_4 \alpha^4 + \dots + \beta_n \alpha^n, \quad (1.51)$$

где $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \dots, \beta_n$ – коэффициенты, которые необходимо определить.

Для получения правильного аппроксимирующего выражения достаточно первых трех членов разложения.

$$x(\alpha) \approx \beta_0 + \beta_1 \alpha^2 + \beta_2 \alpha^4. \quad (1.52)$$

Чтобы найти коэффициенты $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ выражения (1.52) нужно использовать задачу множественной линейной регрессии. Чтобы это сделать, представим результаты измерений и коэффициенты модели (1.52) в виде матрицы:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} 1 & \alpha_1^2 & \alpha_1^4 \\ 1 & \alpha_2^2 & \alpha_2^4 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \alpha_n^2 & \alpha_n^4 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}; e = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}, \quad (1.53)$$

где x – вектор-столбец, который состоит из n измеренных значений координат цветности в интервале углов от α_1 до α_n ; A – матрица, состоящая из независимых переменных; B – вектор-столбец, который включает в себя коэффициенты из выражения (1.52); e – вектор-столбец отклонений, предсказываемых выражением (1.52) значений координат цветности, от измеренных значений $x_1, x_2, \dots, x_n$.

В виде матрицы выражение для e имеет вид:

$$e = x - AB. \quad (1.53)$$

И, используя метод наименьших квадратов:

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 = e^T e = (x - AB)^T (x - AB) \rightarrow \min. \quad 1.54$$

Условие (2.7) будет выполняться, если вектор-столбец B находим по формуле (2.8)

$$B = (A^T A)^{-1} A^T x. \quad (1.55)$$

Для нахождения координат цветности y проводятся аналогичные действия.

Решение уравнения (2.8), используя значения углов и координат цветности дают коэффициенты для координат x и y , а именно β_0, β_1 и β_2 . Соответственно, получим аппроксимирующие выражения для координат x и y .

Для оценки качества аппроксимации, рассчитаем средние ошибки аппроксимации по формулам (1.56) и (1.57).

$$\eta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - \hat{x}_i}{x_i} \right| \cdot 100\%, \quad (1.56)$$

$$\eta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \cdot 100\%, \quad (1.57)$$

где n – количество точек графика, в которых измерялись координаты цветности x_i – измеренные координаты цветности; $\hat{x}_i$ – рассчитанные с помощью аппроксимирующего выражения координаты цветности [140].

1.6 Цели и задачи работы

На основе вышеизложенного можно сформулировать цель и задачи работы. 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.

2 МЕТОД ОЦЕНКИ ОДНОРОДНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЦВЕТОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

2.1 Исходные предпосылки

В настоящем разделе приведено описание метода, который предназначен для численной оценки однородности пространственного распределения цветовых параметров оптических приборов.

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.

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 [141,142].

2.2 Метод оценки однородности пространственного распределения цветовых параметров оптических приборов

Метод включает в себя следующие пункты.

1) Измерение координат цветности в пространстве.

Для измерения параметров источников света в пространстве спектроколориметр крепится к фотодатчику гониофотометра. Источник света крепится к поворотной части гониофотометра. Измерения проводятся в ряде

плоскостей с определенным шагом в пространстве и в ряде значений угловых координат в интервале минус 90...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 прибора.

2) Применение метода математической статистики.

При проведении эксперимента выводится массив экспериментальных данных, которые необходимо обработать 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. Данный метод используется в связи с возможностью использования несколько переменных одновременно. Подробное описание метода представлено в подразделе 1.5.

Метод множественной линейной регрессии состоит из следующих этапов:

2.1) Определение коэффициентов регрессии (β), используя полиномиальное приближение.

2.2) Применение разложения косинуса в ряд Маклорена для определения степени переменной степенного ряда (α).

2.3) Аппроксимация графиков координат цветности x и y полиномом с четными степенями угла α .

2.4) Представление результатов измерений в виде матрицы и дальнейшее нахождение коэффициентов β через транспонирование матрицы.

2.5) Расчет средней ошибки аппроксимации для оценки качества аппроксимации.

3) Расчет отклонения цвета в шагах МакАдама в каждой точке конкретной плоскости и по всем плоскостям.

Перевод координат цветности колориметрической системы МКО 1931 (x, y) в систему МКО 1976 года (u_c', v_c') в каждой точке проводится по формулам (1.9)-(1.11).

Значения координат цветности номинальной КЦТ взяты из стандарта СТО.69159079-01 [2]. Для расчета шагов МакАдама используется формула (1.14).

На следующем этапе, в соответствии с приведёнными выше уравнениями, выполняется расчёт параметров для совокупности точек, охватывающих все измеренные плоскости.

2.3 Применение метода оценки однородности пространственного распределения цветовых параметров оптического излучения к светодиоду

Применим метод, разработанный в подразделе 2.2 для оценки однородности пространственного распределения цветовых параметров оптического излучения в шагах МакАдама к светодиоду.

Осветительные приборы обычно содержат множество светодиодов, пространственное распределение цветовых характеристик оптических приборов (ОП) в значительной степени определяется параметрами применяемого светодиода. Для последующего анализа группы светодиодов и формирования рекомендаций производителям необходимо предварительное исследование характеристик единичного светодиода.

В керамический корпус светодиода с размерами $5 \times 2 \times 1$ мм установлен полупроводниковый кристалл с помощью теплопроводящего клея. Размеры кристалла по площади составляют $(1143 \pm 25 \ 1143 \pm 25)$ мкм. Электрическая мощность кристалла – 1,26 Вт. На кристалл, излучающий на длине волны 455 нм, нанесен слой смеси компаунда и желто-зеленого люминофора толщиной 1 мм. Люминофор использован двух типов. Первый – порошок желто-зеленого цвета на основе иттрий-галлий-алюминиевого граната, активированного церием, 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 корпусом осуществлено с помощью проволочного монтажа (разварки). Кристалл, применяемый в светодиоде, представлен на рисунке 2.1.

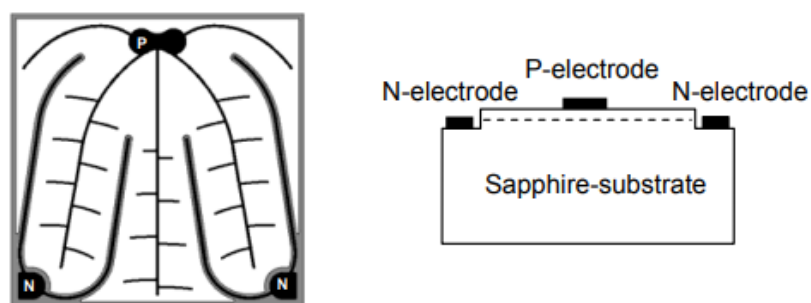


Рисунок 2.1 – Кристалл светодиода

Измерения проводились в диапазоне углов от минус 90 до 90 градусов в 4 плоскостях (вертикальная, горизонтальная и двух наклонных плоскостях). Ввиду статистической незначимости межплоскостных различий, все данные были усреднены в единую обобщенную плоскость для последующего анализа [23,143].

1) Измерения координат цветности в пространстве:

Данные измерений координат цветности и КЦТ в пространстве представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты измерений

Угол	x	y	u	v	Тц, К
-90	0,483±0,02%	0,5±0,02%	0,241±0,02%	0,56±0,02%	2999±5%
-85	0,485±0,02%	0,5±0,02%	0,242±0,02%	0,56±0,02%	2982±5%
-80	0,481±0,02%	0,499±0,02%	0,24±0,02%	0,559±0,02%	2922±5%
-75	0,473±0,02%	0,487±0,02%	0,24±0,02%	0,555±0,02%	2954±5%
-70	0,477±0,02%	0,48±0,02%	0,245±0,02%	0,553±0,02%	2953±5%
-65	0,454±0,02%	0,461±0,02%	0,238±0,02%	0,544±0,02%	3063±5%

Продолжение таблицы 2.1

Угол	x	y	u	v	T _ц , K
-60	0,446±0,02%	0,452±0,02%	0,236±0,02%	0,54±0,02%	3145±5%
-55	0,434±0,02%	0,44±0,02%	0,234±0,02%	0,534±0,02%	3259±5%
-50	0,444±0,02%	0,432±0,02%	0,243±0,02%	0,533±0,02%	3033±5%
-45	0,421±0,02%	0,419±0,02%	0,234±0,02%	0,525±0,02%	3360±5%
-40	0,413±0,02%	0,417±0,02%	0,23±0,02%	0,523±0,02%	3498±5%
-35	0,417±0,02%	0,409±0,02%	0,236±0,02%	0,52±0,02%	3379±5%
-30	0,423±0,02%	0,408±0,02%	0,24±0,02%	0,521±0,02%	3257±5%
-25	0,428±0,02%	0,419±0,02%	0,239±0,02%	0,526±0,02%	3227±5%
-20	0,416±0,02%	0,404±0,02%	0,237±0,02%	0,518±0,02%	3352±5%
-15	0,404±0,02%	0,432±0,02%	0,281±0,02%	0,542±0,02%	2328±5%
-10	0,429±0,02%	0,403±0,02%	0,285±0,02%	0,529±0,02%	2282±5%
-5	0,382±0,02%	0,401±0,02%	0,216±0,02%	0,512±0,02%	4104±5%
0	0,39±0,02%	0,41±0,02%	0,219±0,02%	0,517±0,02%	3953±5%
5	0,378±0,02%	0,396±0,02%	0,216±0,02%	0,51±0,02%	4180±5%
10	0,396±0,02%	0,409±0,02%	0,223±0,02%	0,517±0,02%	3811±5%
15	0,432±0,02%	0,413±0,02%	0,243±0,02%	0,524±0,02%	3118±5%
20	0,365±0,02%	0,394±0,02%	0,209±0,02%	0,507±0,02%	4498±5%
25	0,409±0,02%	0,422±0,02%	0,226±0,02%	0,524±0,02%	3614±5%
30	0,418±0,02%	0,426±0,02%	0,23±0,02%	0,527±0,02%	3459±5%
35	0,434±0,02%	0,449±0,02%	0,231±0,02%	0,537±0,02%	3311±5%
40	0,427±0,02%	0,456±0,02%	0,224±0,02%	0,539±0,02%	3475±5%
45	0,47±0,02%	0,478±0,02%	0,241±0,02%	0,552±0,02%	2944±5%
50	0,491±0,02%	0,493±0,02%	0,247±0,02%	0,559±0,02%	2874±5%
55	0,494±0,02%	0,493±0,02%	0,249±0,02%	0,559±0,02%	2833±5%
60	0,494±0,02%	0,495±0,02%	0,249±0,02%	0,56±0,02%	2843±5%
65	0,5±0,02%	0,481±0,02%	0,257±0,02%	0,557±0,02%	2691±5%

Продолжение таблицы 2.1

Угол	x	y	u	v	T _ц , К
70	0,426±0,02%	0,441±0,02%	0,229±0,02%	0,534±0,02%	3404±5%
75	0,4±0,02%	0,4±0,02%	0,23±0,02%	0,523±0,02%	0±5%
80	0,315±0,02%	0,351±0,02%	0,222±0,02%	0,513±0,02%	0±5%
85	0,2±0,02%	0,2±0,02%	0,215±0,02%	0,510±0,02%	0±5%
90	0,2±0,02%	0,2±0,02%	0,208±0,02%	0,5±0,02%	0±5%

2) Применение метода математической статистики:

Графики координат цветности состоят из $n = 37$ точек, шаг по углу α составляет 5° .

Аппроксимация осуществляется степенным рядом

$$x(\alpha) \approx \beta_0 + \beta_1 \alpha^2 + \beta_2 \alpha^4 \quad (2.1)$$

Решение уравнения (2.1), используя значения углов и координат цветности дают коэффициенты

для координаты x:

$$\beta_{0x} = 4,25 \cdot 10^{-1};$$

$$\beta_{1x} = 2,048 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-2};$$

$$\beta_{2x} = -4,978 \cdot 10^{-9} \text{ град}^{-4},$$

для координаты y:

$$\beta_{0y} = 4,26 \cdot 10^{-1};$$

$$\beta_{1y} = 2,378 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-2};$$

$$\beta_{2y} = -5,553 \cdot 10^{-9} \text{ град}^{-4},$$

Соответственно, получим аппроксимирующие выражения для координат x и y.

$$x_{norm}(\alpha) = 4,25 \cdot 10^{-1} + 2,048 \cdot 10^{-5} \alpha^2 + -4,978 \cdot 10^{-9} \alpha^4$$

$$y_{norm}(\alpha) = 4,26 \cdot 10^{-1} + 2,378 \cdot 10^{-5} \alpha^2 - 5,553 \cdot 10^{-9} \alpha^4$$

Средняя ошибка аппроксимации, рассчитанная по (1.56)-(1.57) из первого раздела составляет

$$\eta_{\text{polynomial } x} = 9,3\%$$

$$\eta_{\text{polynomial } y} = 5,1\%$$

Значение средней ошибки аппроксимации не выходит за границы допустимого отклонения ($\leq 10\%$), результаты можно считать достоверными [144].

Результаты измерений показаны на рисунках 2.2-2.3. Пунктирными линиями показан доверительный интервал с доверительной вероятностью 95%. Красной линией показана аппроксимирующая кривая.

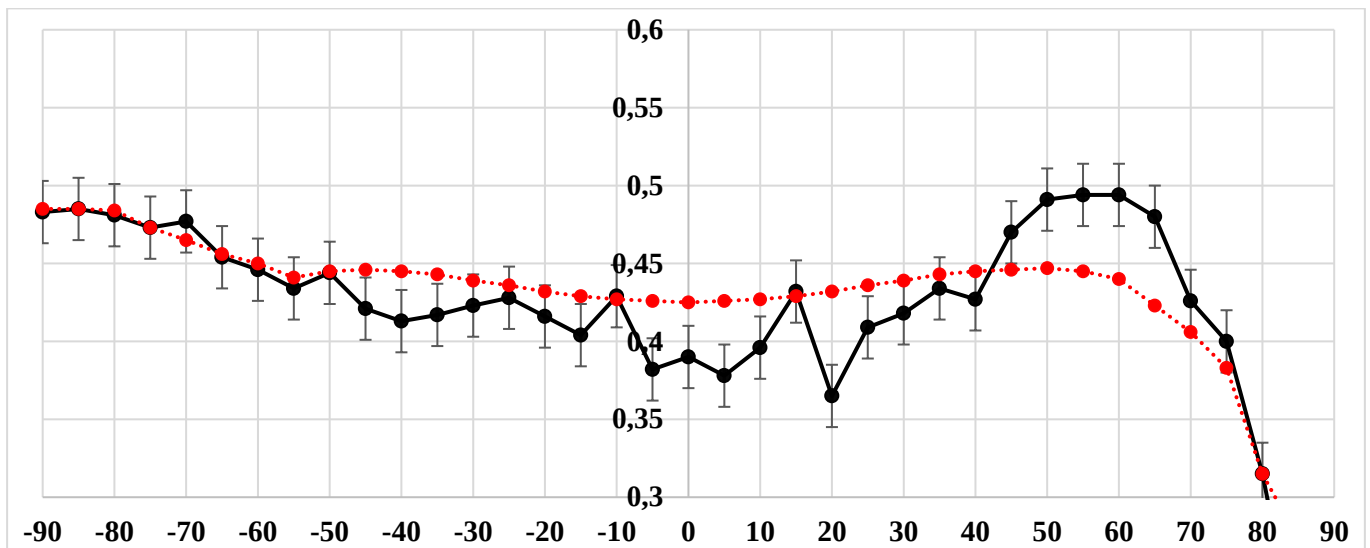


Рисунок 2.2 – Зависимость координат цветности x от угла излучения светодиода

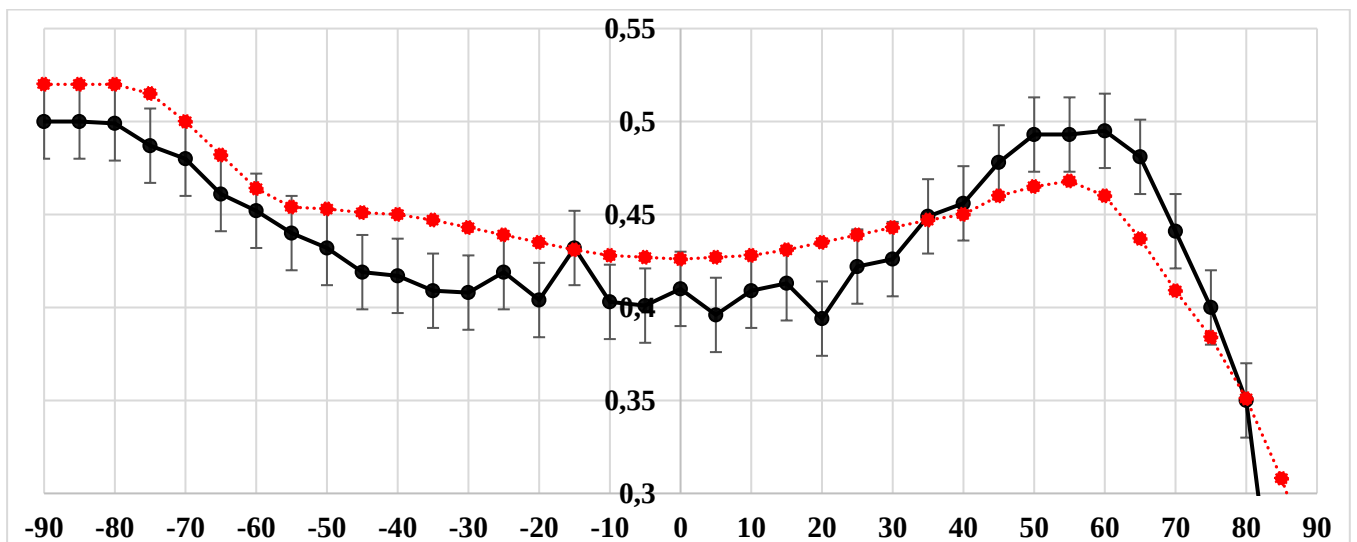


Рисунок 2.3 – Зависимость координат цветности y от угла излучения светодиода

3) Проведение расчета отклонения цвета в шагах МакАдама в каждой точке конкретной плоскости, и по всем плоскостям.

Далее рассчитаем отклонение цвета в шагах МакАдама по формуле (1.14).
График отклонения цвета в пространстве представлен на рисунке 2.4.

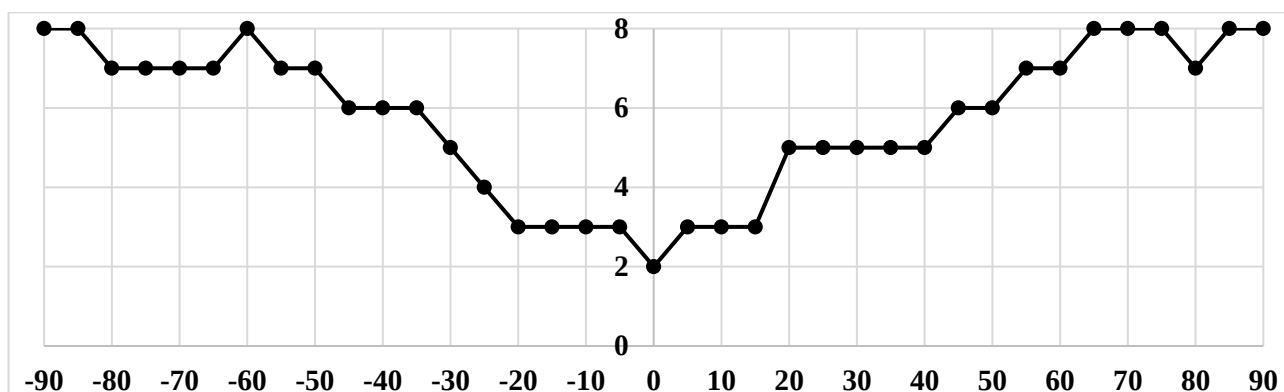


Рисунок 2.4 – График отклонения цвета в шагах МакАдама

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 для единичного светодиода [24].

В интервале углов минус 25 ...минус 90 и 20...90 градусов отклонение превышает 5 шагов, что не соответствует допустимым нормам согласно СТО.69159079-05-2020 и находится выше порога восприятия цветовых различий человеческим зрением. В связи с этим необходимо модифицировать технологию производства светодиода для уменьшения пространственной цветовой неравномерности.

2.4 Применение метода оценки однородности пространственного распределения цветовых параметров оптического излучения к светодиодному источнику света

В данном разделе показана применимость предложенного в разделе 2.2 метода для оценки однородности пространственного распределения цветовых параметров оптического излучения к светодиодному источнику света.

Светодиодный источник света состоит из основания с металлическими

выводами на концах, клеевого слоя, полупроводниковых GaN/InGaN-кристаллов и люминофорной композиции. Основание в виде светодиодной 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, что длинная сторона кристалла сонаправлена с длинной стороной основания. Основание с кристаллами окружено люминофорной композицией. Электрическое соединение кристаллов осуществлено с помощью проволочного монтажа (разварки) [145-147]. Упрощенное представление конструкции светодиодного излучающего элемента показано на рисунке 2.5.

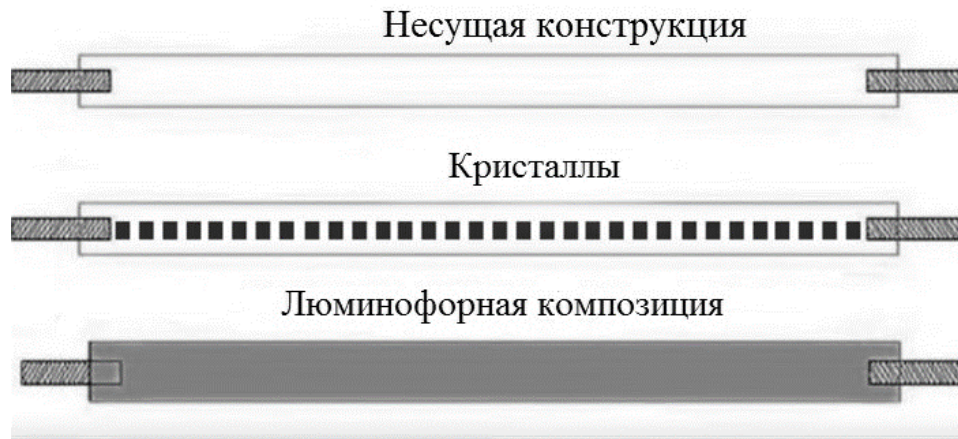
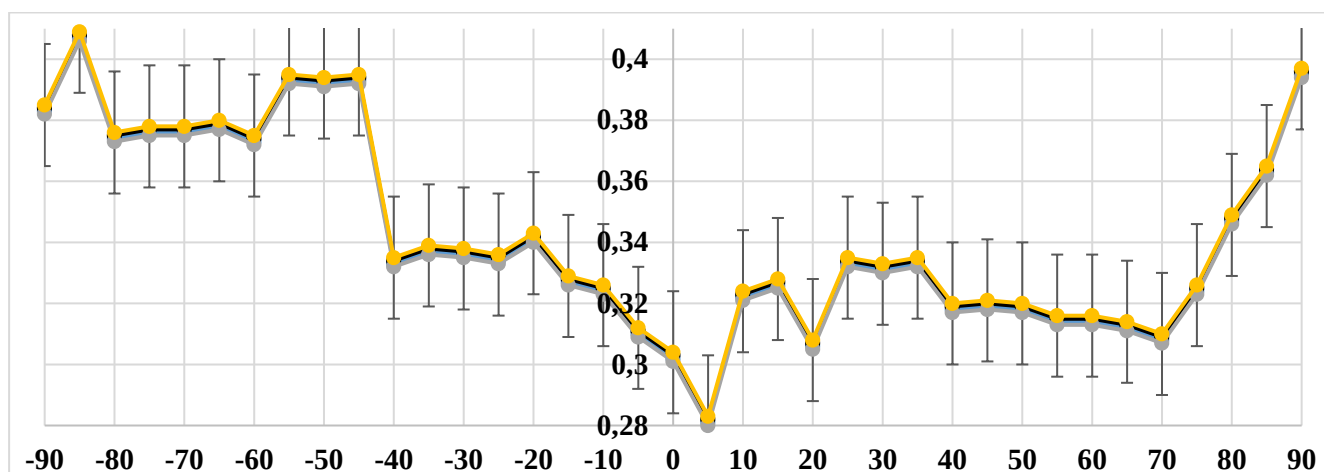


Рисунок 2.5 – Упрощенное представление конструкции светодиодного излучающего элемента (электрические связи кристаллов условно не показаны)

Измерения координат цветности в пространстве.

Измерения проводились в диапазоне углов от минус 90 до 90 градусов в 4 плоскостях (вертикальная, горизонтальная и двух наклонных плоскостях) (рисунок 2.6).

Рисунок 2.6 – Измерения координаты x в 4 плоскостях

Поскольку различия между плоскостями не превышали уровень погрешности, все данные были объединены в одну плоскость для последующего анализа [23,143].

Измерения координат цветности и КЦТ в пространстве представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты измерений

Угол	x	y	u	v	T_c, K
-90	$0,383 \pm 0,02\%$	$0,306 \pm 0,02\%$	$0,26 \pm 0,02\%$	$0,466 \pm 0,02\%$	$3316 \pm 5\%$
-85	$0,407 \pm 0,02\%$	$0,387 \pm 0,02\%$	$0,238 \pm 0,02\%$	$0,51 \pm 0,02\%$	$3436 \pm 5\%$
-80	$0,374 \pm 0,02\%$	$0,329 \pm 0,02\%$	$0,241 \pm 0,02\%$	$0,478 \pm 0,02\%$	$3879 \pm 5\%$
-75	$0,376 \pm 0,02\%$	$0,333 \pm 0,02\%$	$0,241 \pm 0,02\%$	$0,48 \pm 0,02\%$	$3832 \pm 5\%$
-70	$0,376 \pm 0,02\%$	$0,333 \pm 0,02\%$	$0,241 \pm 0,02\%$	$0,48 \pm 0,02\%$	$3844 \pm 5\%$
-65	$0,378 \pm 0,02\%$	$0,338 \pm 0,02\%$	$0,24 \pm 0,02\%$	$0,483 \pm 0,02\%$	$3821 \pm 5\%$
-60	$0,373 \pm 0,02\%$	$0,333 \pm 0,02\%$	$0,239 \pm 0,02\%$	$0,48 \pm 0,02\%$	$3926 \pm 5\%$
-55	$0,393 \pm 0,02\%$	$0,366 \pm 0,02\%$	$0,238 \pm 0,02\%$	$0,498 \pm 0,02\%$	$3608 \pm 5\%$
-50	$0,392 \pm 0,02\%$	$0,365 \pm 0,02\%$	$0,237 \pm 0,02\%$	$0,498 \pm 0,02\%$	$3637 \pm 5\%$
-45	$0,393 \pm 0,02\%$	$0,367 \pm 0,02\%$	$0,237 \pm 0,02\%$	$0,499 \pm 0,02\%$	$3622 \pm 5\%$
-40	$0,333 \pm 0,02\%$	$0,317 \pm 0,02\%$	$0,217 \pm 0,02\%$	$0,465 \pm 0,02\%$	$5525 \pm 5\%$
-35	$0,337 \pm 0,02\%$	$0,317 \pm 0,02\%$	$0,22 \pm 0,02\%$	$0,465 \pm 0,02\%$	$5314 \pm 5\%$

Продолжение таблицы 2.2

Угол	x	y	u	v	T _ц , К
-30	0,336±0,02%	0,317±0,02%	0,22±0,02%	0,465±0,02%	5348±5%
-25	0,334±0,02%	0,314±0,02%	0,219±0,02%	0,463±0,02%	5459±5%
-20	0,341±0,02%	0,304±0,02%	0,229±0,02%	0,458±0,02%	5086±5%
-15	0,327±0,02%	0,288±0,02%	0,226±0,02%	0,447±0,02%	5930±5%
-10	0,324±0,02%	0,292±0,02%	0,221±0,02%	0,449±0,02%	6146±5%
-5	0,31±0,02%	0,298±0,02%	0,208±0,02%	0,451±0,02%	7006±5%
0	0,302±0,02%	0,288±0,02%	0,206±0,02%	0,443±0,02%	7845±5%
5	0,281±0,02%	0,264±0,02%	0,2±0,02%	0,424±0,02%	11808±5%
10	0,322±0,02%	0,307±0,02%	0,213±0,02%	0,458±0,02%	6126±5%
15	0,326±0,02%	0,3±0,02%	0,219±0,02%	0,454±0,02%	5917±5%
20	0,306±0,02%	0,295±0,02%	0,207±0,02%	0,448±0,02%	7336±5%
25	0,333±0,02%	0,312±0,02%	0,219±0,02%	0,462±0,02%	5504±5%
30	0,331±0,02%	0,309±0,02%	0,22±0,02%	0,46±0,02%	5595±5%
35	0,333±0,02%	0,31±0,02%	0,22±0,02%	0,461±0,02%	5526±5%
40	0,318±0,02%	0,299±0,02%	0,213±0,02%	0,452±0,02%	6479±5%
45	0,319±0,02%	0,303±0,02%	0,212±0,02%	0,455±0,02%	6382±5%
50	0,318±0,02%	0,304±0,02%	0,212±0,02%	0,455±0,02%	6391±5%
55	0,314±0,02%	0,303±0,02%	0,209±0,02%	0,454±0,02%	6642±5%
60	0,314±0,02%	0,303±0,02%	0,209±0,02%	0,454±0,02%	6653±5%
65	0,312±0,02%	0,308±0,02%	0,205±0,02%	0,456±0,02%	6781±5%
70	0,308±0,02%	0,308±0,02%	0,203±0,02%	0,456±0,02%	7000±5%
75	0,324±0,02%	0,328±0,02%	0,206±0,02%	0,47±0,02%	5907±5%
80	0,347±0,02%	0,35±0,02%	0,213±0,02%	0,484±0,02%	4955±5%
85	0,363±0,02%	0,366±0,02%	0,218±0,02%	0,494±0,02%	4457±5%
90	0,395±0,02%	0,399±0,02%	0,226±0,02%	0,513±0,02%	3772±5%

2) Применение метода математической статистики:

Графики координат цветности состоят из $n = 37$ точек, шаг по углу α составляет 5° . Решение уравнения (2.4), используя значения углов и координат цветности дают коэффициенты

для координаты x :

$$\begin{aligned}\beta_{0x} &= 3,42 \cdot 10^{-1}; \\ \beta_{1x} &= -1,647 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-2}; \\ \beta_{2x} &= 2,055 \cdot 10^{-9} \text{ град}^{-4},\end{aligned}$$

для координаты y :

$$\begin{aligned}\beta_{0y} &= 3,21 \cdot 10^{-1}; \\ \beta_{1y} &= -1,387 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-2}; \\ \beta_{2y} &= 2,225 \cdot 10^{-9} \text{ град}^{-4},\end{aligned}$$

Соответственно, получим аппроксимирующие выражения для координат x и y .

$$\begin{aligned}x_{norm}(\alpha) &= 3,42 \cdot 10^{-1} - 1,647 \cdot 10^{-5} + 2,055 \cdot 10^{-9} \\ y_{norm}(\alpha) &= 3,21 \cdot 10^{-1} - 1,387 \cdot 10^{-5} + 2,225 \cdot 10^{-9}\end{aligned}$$

Средняя ошибка аппроксимации на основе (1.56)-(1.57) из первого раздела составляет

$$\begin{aligned}\eta_{\text{polynomial } x} &= 9,5\% \\ \eta_{\text{polynomial } y} &= 9,8\%\end{aligned}$$

Значение средней ошибки аппроксимации не выходит за границы допустимого отклонения ($\leq 10\%$), результаты можно считать достоверными [144].

Результаты показаны на рисунках 2.7-2.8. Пунктирными линиями показан доверительный интервал с доверительной вероятностью 95%. Красной линией показана аппроксимирующая кривая.

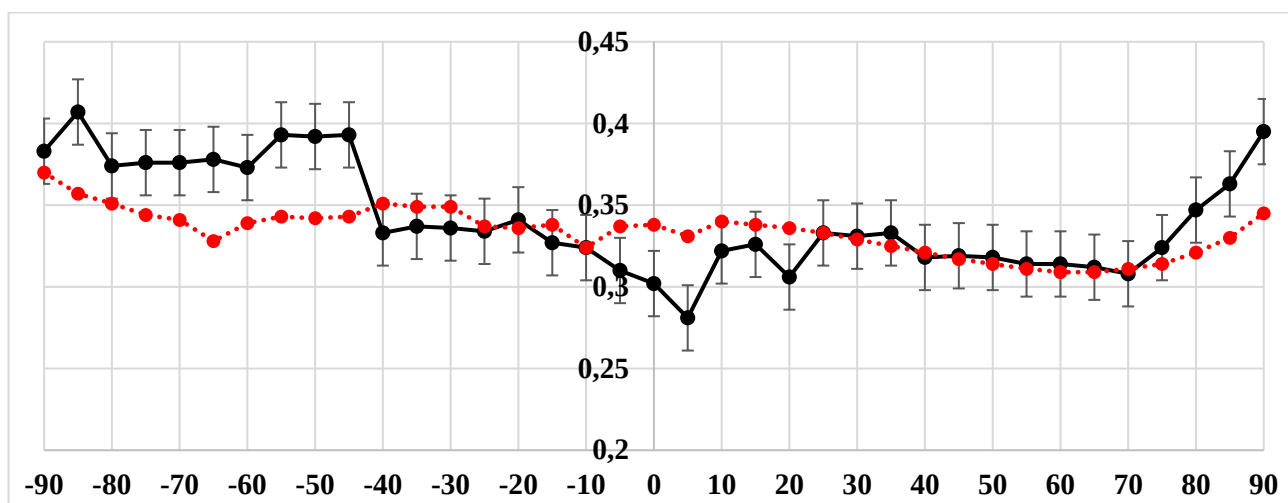


Рисунок 2.7 – Зависимость координат цветности X от угла излучения
светодиодного излучающего элемента

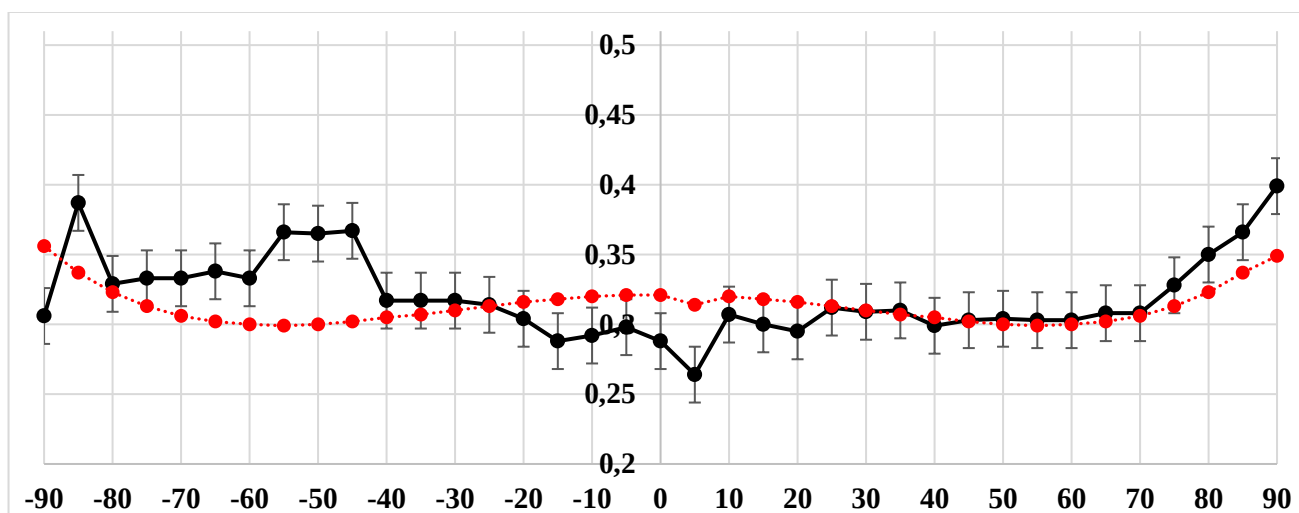


Рисунок 2.8 – Зависимость координат цветности Y от угла излучения
светодиодного излучающего элемента

3) Проведение расчета отклонения цвета в шагах МакАдама в каждой точке конкретной плоскости и по всем плоскостям.

Рассчитаем отклонение цвета в значениях МакАдама по формуле (1.14).

На рисунке 2.9 приведен график отклонения цвета в пространстве.

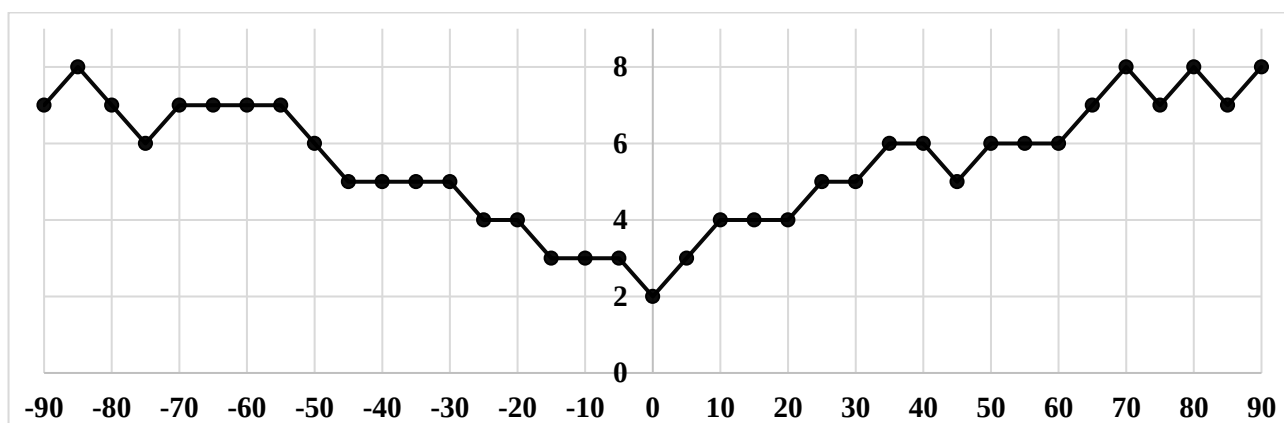


Рисунок 2.9 – График отклонения цвета в шагах МакАдама

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 для светодиодного излучающего элемента.

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.

2.5 Выводы по разделу 2

В данном разделе предложен новый метод численной оценки однородности пространственного распределения цветовых параметров оптических приборов,

Метод включает в себя следующие пункты:

- 1) Измерение координат цветности в пространстве.
- 2) Применение метода математической статистики.
- 3) Проведение расчета отклонения цвета в шагах МакАдама в каждой точке конкретной плоскости, и по всем плоскостям.

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 где, что свидетельствует о значительном 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.

3 НОВЫЕ СПОСОБЫ И ПРОЦЕССЫ СОЗДАНИЯ ПРИБОРОВ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С УЛУЧШЕННЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ РАВНОМЕРНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЦВЕТА

3.1 Исходные предпосылки

В подразделах 2.3 и 2.4 экспериментально установлено, что светодиоды и светодиодные источники света обладают следующим недостатком: при оценке цветового отклонения в шагах МакАдама a максимальные – от минус 90 до минус 30 и от 30 до 90 градусов. Это приводит к видимому расхождению в цветопередаче: может наблюдаться заметное несоответствие между цветом равномерно окрашенной поверхности и излучением источника. Для устранения этого недостатка требуется модификация конструкции и изменения технологии изготовления рассматриваемых оптических приборов. В данном разделе предлагаются изменения в технологическом процессе с применением диффузанта, направленные на улучшение пространственной однородности распределения координат цветности.

3.2 Новые конструкции оптических приборов с применением диффузанта

3.2.1 Новая конструкция светодиода с применением диффузанта

Сущность предлагаемого технологического решения заключается в добавлении в люминофорную композицию светодиода диффузанта. Слой компаунда с диффузантом служит для дополнительного перемешивания излучений кристалла и люминофора, что позволяет получить равномерное распределение КЦТ в пространстве.

Светоизлучающий кристалл установлен на плате, выполненной в виде многослойной структуры, которая содержит теплоотводящую основу с размещенными на ней последовательно слоями диэлектрического материала и металлических слоев.

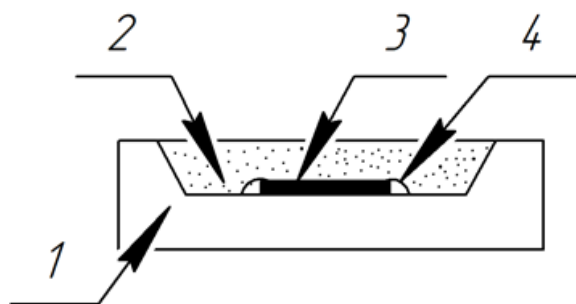


Рисунок 3.1 – Конструкция светодиода

Конструкция светодиода представлена на рисунке 3.1. Здесь: 1 – теплоотводящая основа с нанесенным клеевым слоем, 2 – люминофорная композиция с диффузантом, 3 – излучающий кристалл, 4 – соединительная проволока.

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 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты измерений

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%

Продолжение таблицы 3.1

Концентрация диффузанта, %	Световой поток, лм	Световая отдача, лм/Вт	КЦТ,
4	$61 \pm 10\%$	$100,33 \pm 10,02\%$	$7186 \pm 5\%$
5	$62,6 \pm 10\%$	$102,96 \pm 10,02\%$	$5395 \pm 5\%$
6	$62 \pm 10\%$	$98,88 \pm 10,02\%$	$5042 \pm 5\%$
7	$60 \pm 10\%$	$98,68 \pm 10,02\%$	$5881 \pm 5\%$
Без диффузанта	$58,4 \pm 10\%$	$99,15 \pm 10,02\%$	$7847 \pm 5\%$

Исследования проводились в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. На каждой плоскости исследования выполнялись в интервале минус 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 3.2 представлены результаты испытаний отклонения цвета в шагах МакАдама в зависимости от концентрации диффузанта в интервале от минус 90 до 90 градусов.

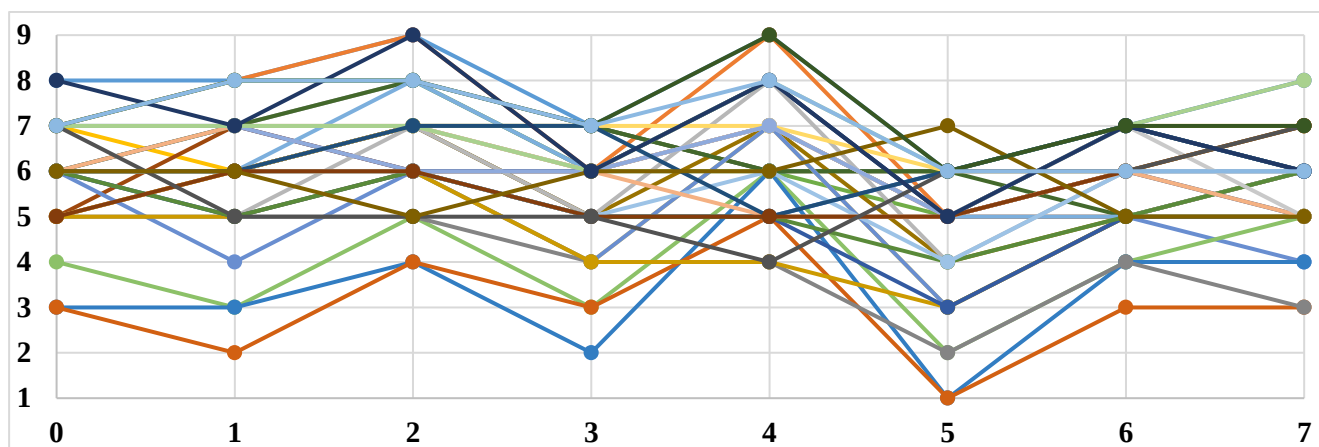


Рисунок 3.2 – График зависимости отклонения цвета в шагах МакАдама от концентрации диффузанта

Сравнение полученных графиков для всех угловых координат и в том числе показанных на рисунке 3.2 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%.

Применим метод, предложенный в разделе 2.2, для оценки однородности пространственного распределения цветовых параметров оптического излучения светодиода с диффузантаом.

1) Измерение координат цветности в пространстве.

На рисунках 3.3-3.5 показаны графики до и после нанесения диффузанта на характеристиках координат цветности и коррелированной цветовой температуры. Пунктирной линией на всех графиках показаны значения без диффузанта, сплошной линией – с диффузантаом.

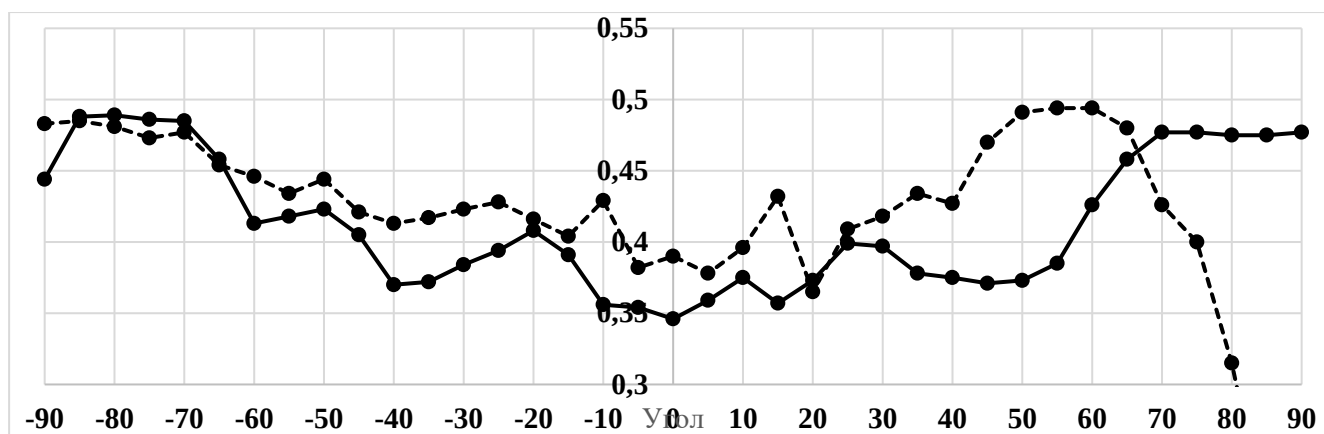


Рисунок 3.3 – Зависимость координат цветности X от угла излучения светодиода

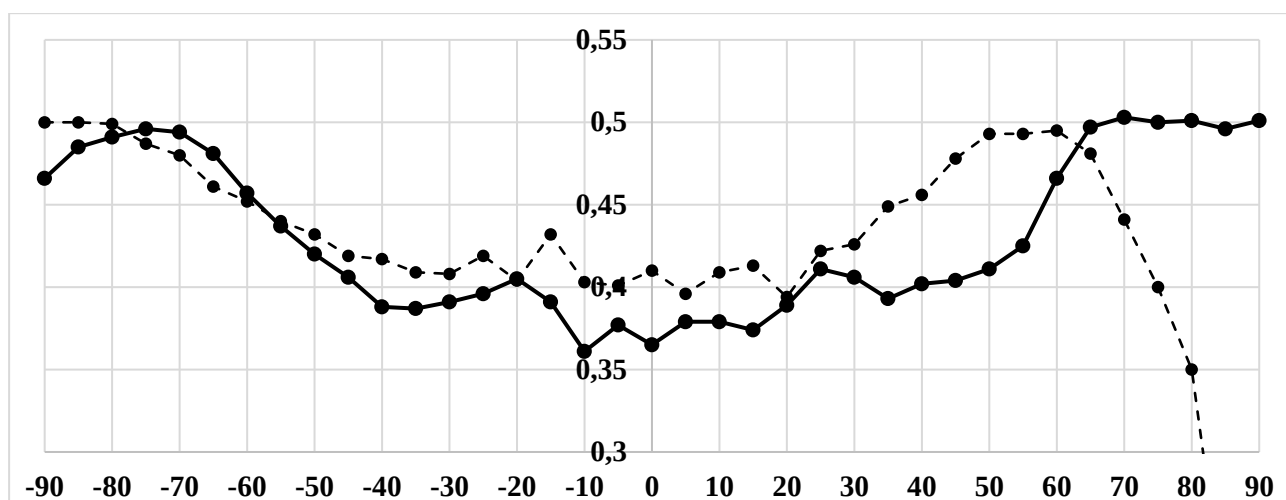


Рисунок 3.4 – Зависимость координат цветности Y от угла излучения светодиода

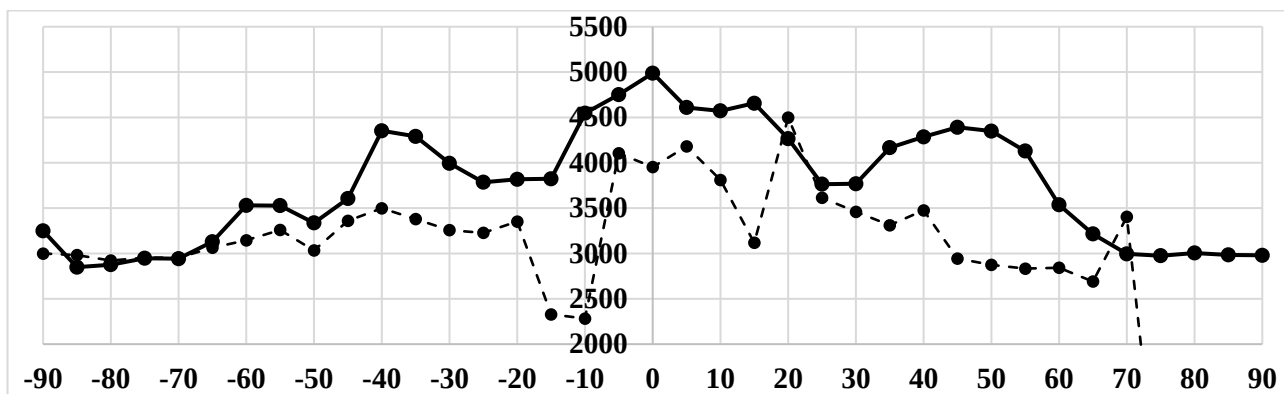


Рисунок 3.5 – Зависимость коррелированной цветовой температуры от угла излучения светодиода

2) Применение метода математической статистики:

Графики координат цветности состоят из $n = 37$ точек, шаг по углу α составляет 5° . Решение уравнения (2.8), используя значения углов и координат цветности дают коэффициенты

для координаты x :

$$\beta_{0x} = 4,03 \cdot 10^{-1};$$

$$\beta_{1x} = -5,133 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-2};$$

$$\beta_{2x} = 7,686 \cdot 10^{-10} \text{ град}^{-4},$$

для координаты y :

$$\beta_{0y} = 4,3 \cdot 10^{-1};$$

$$\beta_{1y} = -2,988 \cdot 10^{-7} \text{ град}^{-2};$$

$$\beta_{2y} = 2,24 \cdot 10^{-10} \text{ град}^{-4},$$

Соответственно, получим аппроксимирующие выражения для координат x и y .

$$x_{norm}(\alpha) = 4,13 \cdot 10^{-1} - 5,133 \cdot 10^{-6} \alpha^2 + 7,686 \cdot 10^{-10} \alpha^4$$

$$y_{norm}(\alpha) = 4,3 \cdot 10^{-1} - 2,988 \cdot 10^{-7} \alpha^2 + 2,24 \cdot 10^{-10} \alpha^4$$

Средняя ошибка аппроксимации для выражений (1.56)-(1.57) составляет

$$\eta_{\text{polynomial } x} = 5,6\%$$

$$\eta_{\text{polynomial } y} = 7,2\%$$

3) Проведение расчета отклонения цвета в шагах МакАдама в каждой точке

конкретной плоскости, и по всем плоскостям.

Далее, на основе полученных данных рассчитаем отклонение цвета в шагах МакАдама по формуле (2.13) и сравним с исходным графиком. График отклонения цвета в пространстве при добавлении диффузанта представлен на рисунке 3.6. Пунктирной линией обозначен исходный график (без добавления диффузанта).

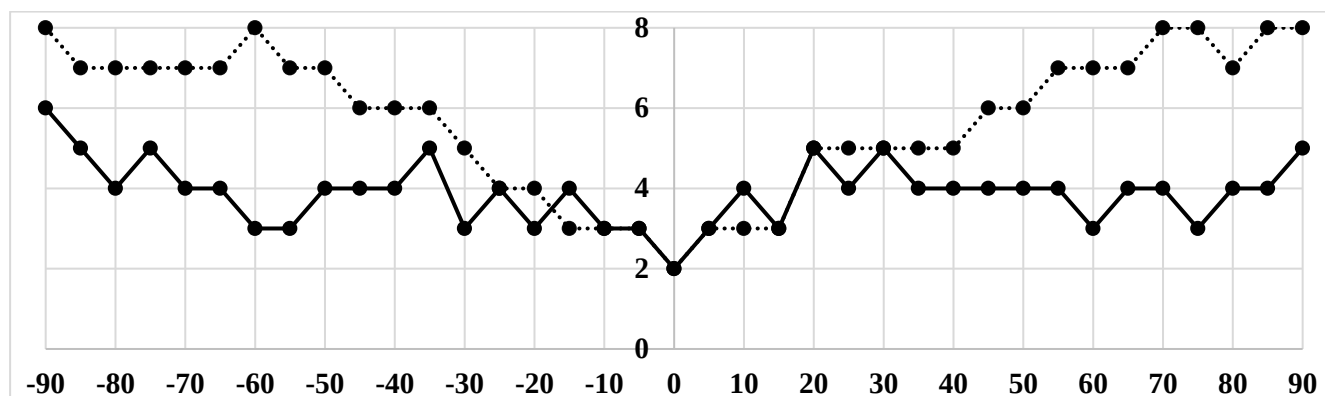


Рисунок 3.6 – График отклонения цвета светодиода в пространстве в шагах МакАдама

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.

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) [149].

3.2.2 Новая конструкция светодиодного источника света с применением диффузанта

Усовершенствование достигается тем, что на светодиодной ленте для лампы, содержащей протяженную подложку с металлическими наконечниками на краях, на которой размещены излучающие кристаллы синего цвета свечения, электрически соединенные проволокой согласно и последовательно вместе с

наконечниками, на кристаллы нанесена люминофорная композиция, поверх которой размещен слой компаунда с диффузантом.

Слой компаунда с диффузантом служит для дополнительного перемешивания излучений кристалла и люминофора, что позволяет получить равномерное распределение КЦТ в пространстве над излучающей поверхностью светодиодного источника света.

На рисунке 3.7 обозначено: 1 – металлический вывод, 2 – подложка из теплопроводящего материала с нанесенным клеевым слоем, 3 – излучающие кристаллы, 4 – соединительная проволока, 5 – люминофорная композиция с диффузантом.

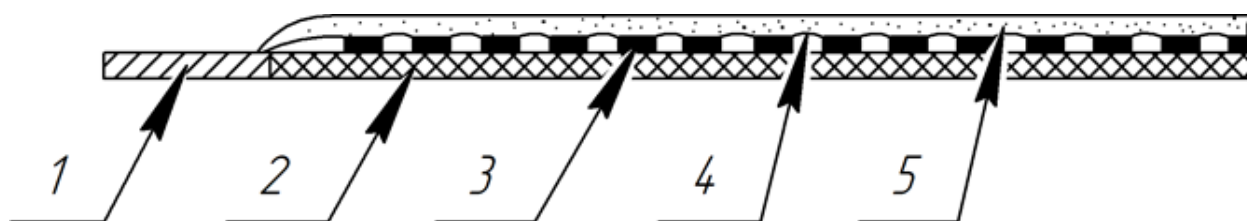


Рисунок 3.7 – Конструкция светодиодной ленты

Светодиодные кристаллы рассчитаны на прямой ток 10 мА, обладают излучением с длиной волны 460...465 нм. На кристаллы нанесен слой люминофорной композиции с диффузантом концентрацией 5% от массы компаунда.

Измерения светотехнических характеристик ленты (цветовых координат и коррелированной цветовой температуры) проводились при прямом токе 10 мА при помощи CS-200 Chromameter Konica Minolta. Исследования проводились в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. На каждой плоскости исследования выполнялись в интервале минус 90...90 градусов с шагом в 5 градусов. Расхождения в данных по обеим плоскостям не превышали погрешность измерений, поэтому полученные данные усреднены.

Применим метод, предложенный в разделе 2.2 для оценки однородности пространственного распределения цветовых параметров оптического излучения светодиодного источника света с диффузантом.

1) Измерения координат цветности в пространстве.

На рисунках 3.8-3.10 показаны графики до и после нанесения диффузанта на характеристиках: координаты цветности и коррелированной цветовой температуры.

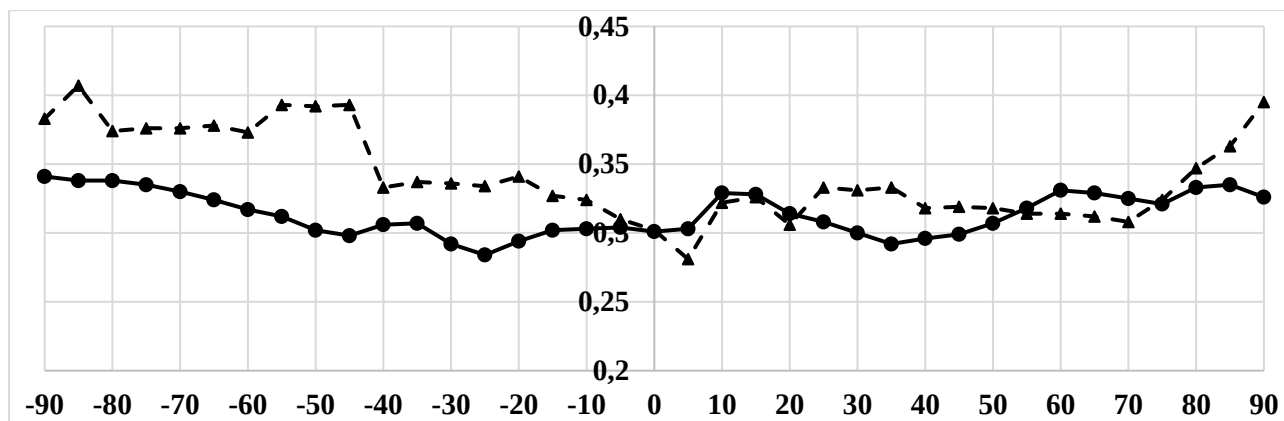


Рисунок 3.8 – Зависимость координат цветности X от угла излучения светодиодного источника света

Пунктирной линией показаны значения координаты цветности X без диффузанта, сплошной линией – с диффузантом.

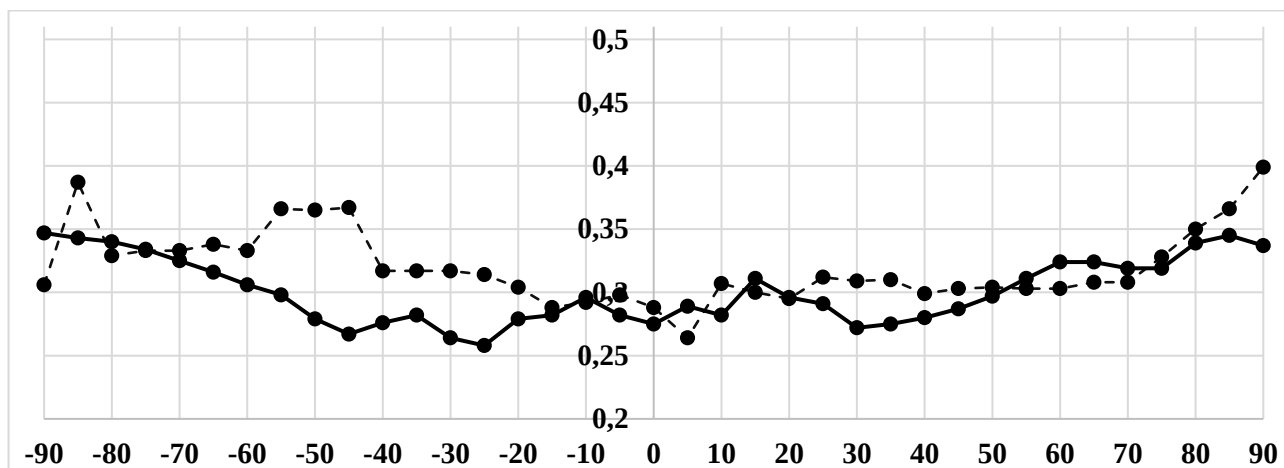


Рисунок 3.9 – Зависимость координат цветности Y от угла излучения светодиодного источника света

Пунктирной линией показаны значения координаты цветности Y без диффузанта, сплошной линией – с диффузантом.

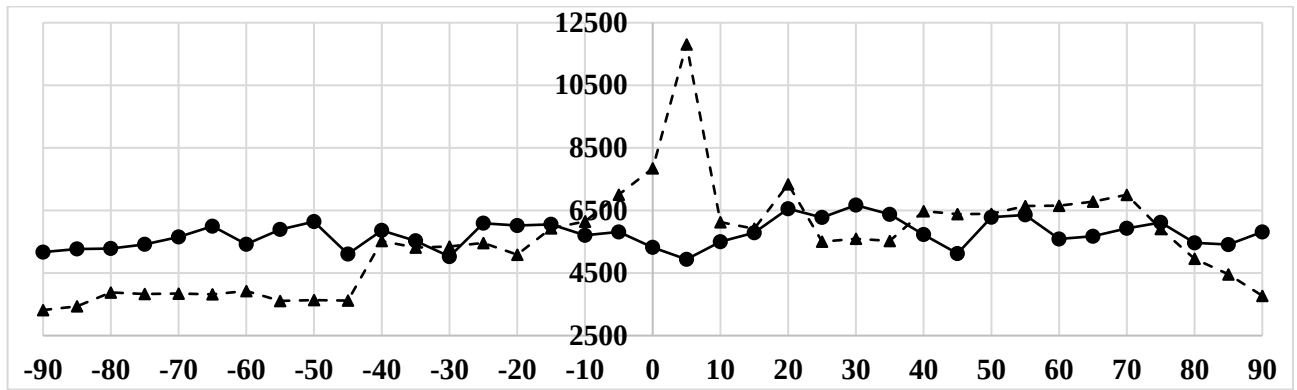


Рисунок 3.10 – Зависимость коррелированной цветовой температуры от угла излучения светодиодной ленты

Пунктирной линией показаны значения коррелированной цветовой температуры без диффузанта, сплошной линией – с диффузанта.

2) Применение метода математической статистики:

Графики координат цветности состоят из $n = 37$ точек, шаг по углу α составляет 5° . Решение уравнения (2.8) дают коэффициенты

для координаты x :

$$\beta_{0x} = 3,16 \cdot 10^{-1};$$

$$\beta_{1x} = 1,423 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-2};$$

$$\beta_{2x} = -2,871 \cdot 10^{-10} \text{ град}^{-4},$$

для координаты y :

$$\beta_{0y} = 3,01 \cdot 10^{-1};$$

$$\beta_{1y} = 3,43 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-2};$$

$$\beta_{2y} = -5,401 \cdot 10^{-10} \text{ град}^{-4},$$

Соответственно, получим аппроксимирующие выражения для координат x и y .

$$x_{norm}(\alpha) = 3,16 \cdot 10^{-1} + 1,423 \cdot 10^{-6} \alpha^2 - 2,871 \cdot 10^{-10} \alpha^4$$

$$y_{norm}(\alpha) = 3,01 \cdot 10^{-1} + 3,43 \cdot 10^{-6} \alpha^2 - 5,401 \cdot 10^{-10} \alpha^4$$

Средняя ошибка аппроксимации для выражений (1.56) и (1.57) составляет

$$\eta_{\text{polynomial } x} = 7,5\%$$

$$\eta_{\text{polynomial } y} = 6,9\%$$

3) Проведение расчета отклонения цвета в шагах МакАдама в каждой точке конкретной плоскости, и по всем плоскостям.

График отклонения цвета в пространстве представлен на рисунке 3.11.

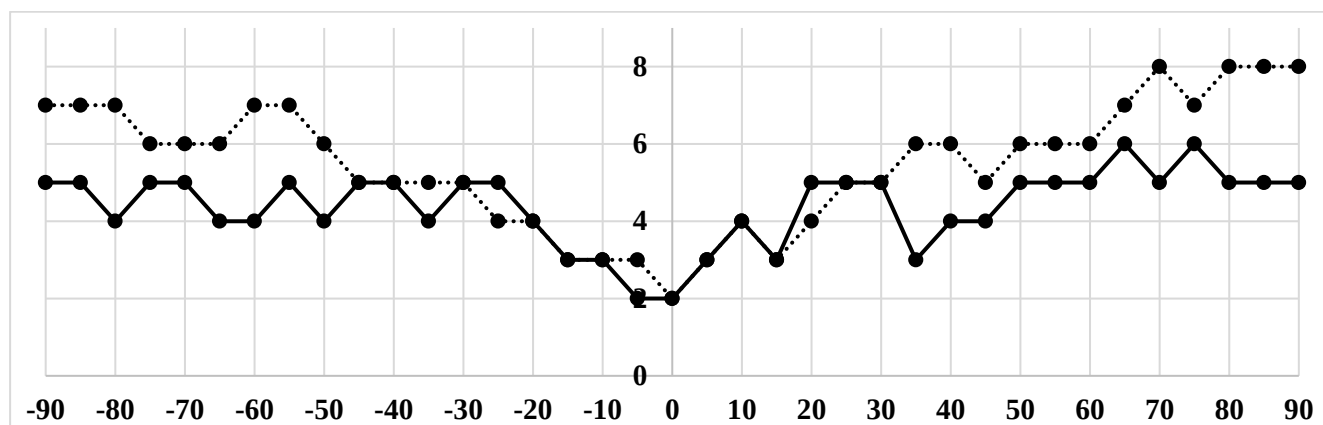


Рисунок 3.11 – График отклонения цвета светодиодного источника света в пространстве в шагах МакАдама

Как видно по графику, отклонение цвета уменьшается на 2 шага МакАдама.

Предлагаемая конструкция светодиодного источника света доступна для массового производства ламп практически без изменения технологического заводского процесса, в том числе и для автоматизированной сборки, характеризуется новизной и защищена патентом на полезную модель [150].

Применение технологии добавления диффузанта в люминофорную композицию позволяет разрабатывать светоизлучающие диоды, в том числе в составе устройств с искусственно созданной неравномерностью [151-153].

3.2.3 Сравнительные эксперименты с зарубежными аналогами

Успешные эксперименты с добавлением диффузанта в люминофорную композицию подтвердили работоспособность метода, показав уменьшение отклонения цвета в шагах МакАдама на 2 шага. В связи с этим, для комплексной оценки технологии были проведены аналогичные опыты с использованием зарубежных аналогов. Использовались светодиоды Cree MHDGWT-0000-000NOBN250E, а также светодиодные лампы OSRAM LSCLA150 и Gauss Filament A60 [154-156].

На рисунках 3.12 – 3.23 представлены графики сравнения координат цветности, КЦТ и отклонения цвета в шагах МакАдама с применением диффузанта и без него. Пунктирной линией на всех графиках показана кривая без применения диффузанта, сплошная – с диффузантом

1) Светодиод Cree MHDGWT-0000-000NOBN250E

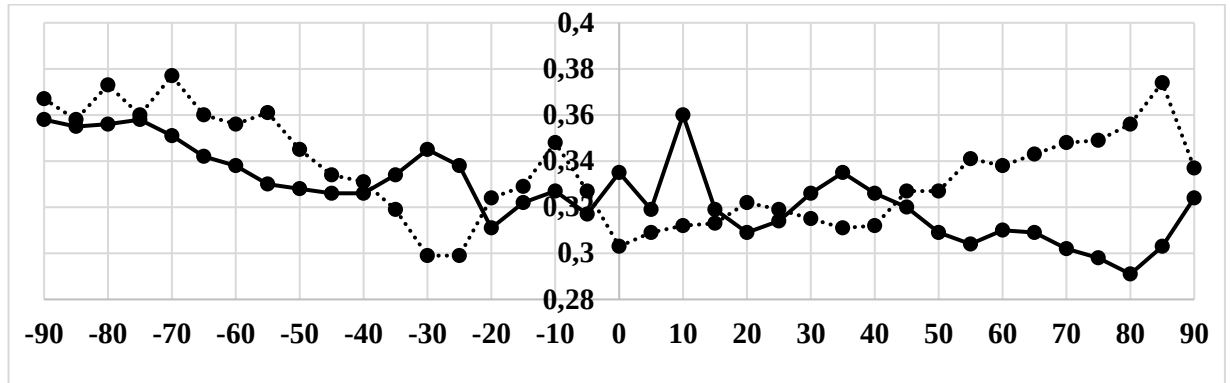


Рисунок 3.12 – Зависимость координат цветности X от угла излучения светодиода

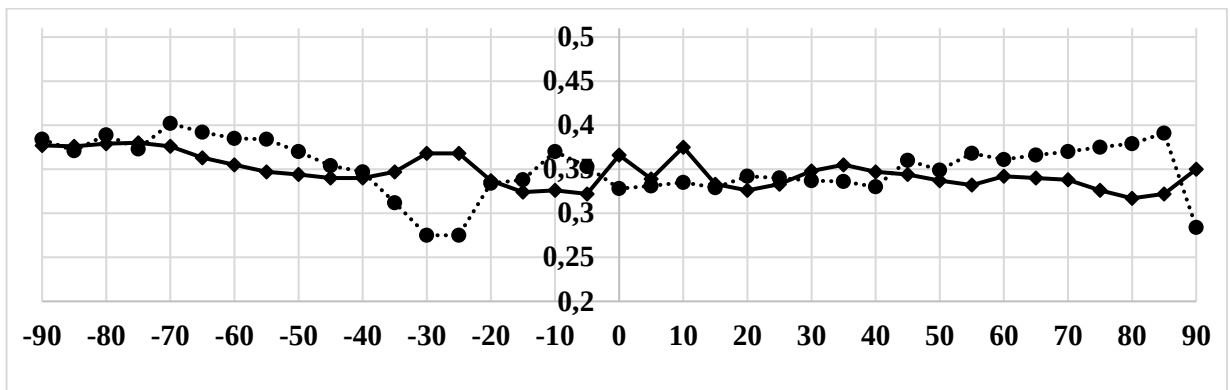


Рисунок 3.13 – Зависимость координат цветности Y от угла излучения светодиода

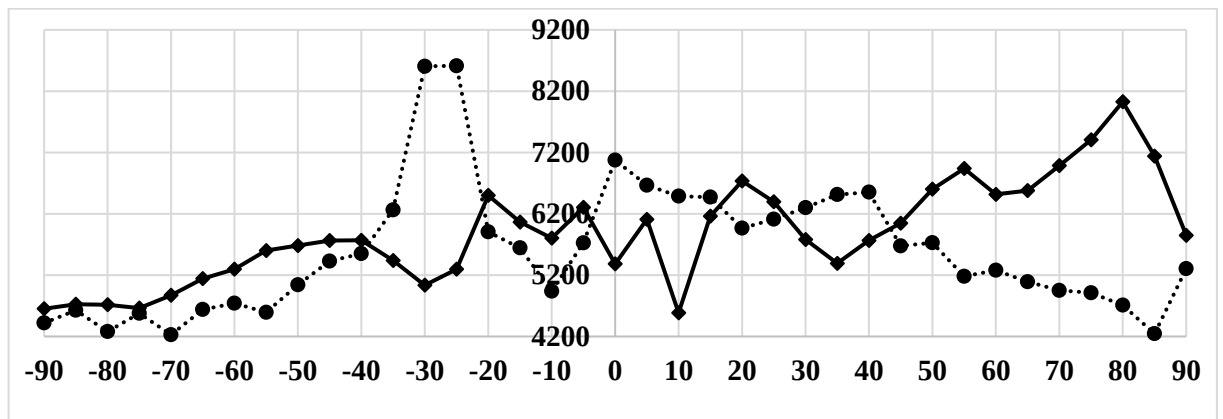


Рисунок 3.14 – Зависимость КЦТ от угла излучения светодиода

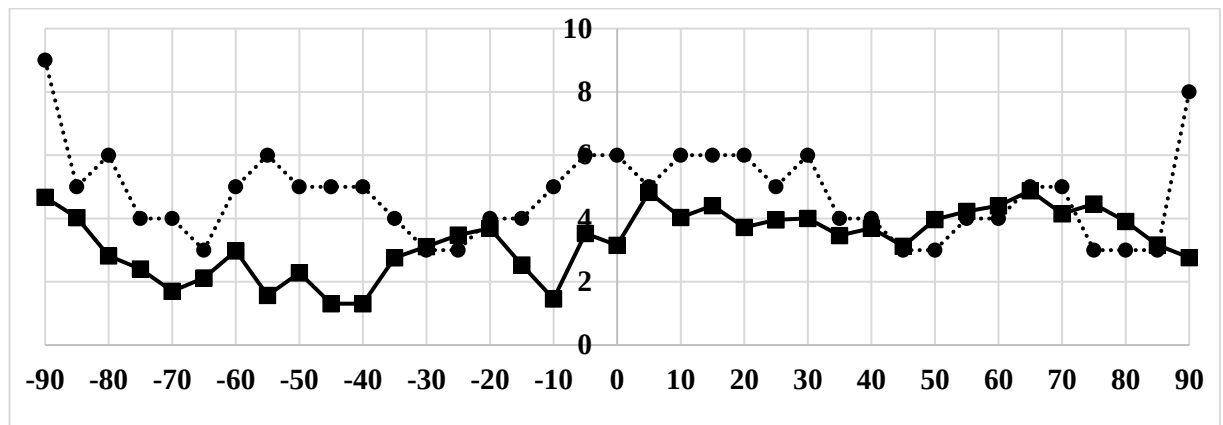


Рисунок 3.15 – Зависимость отклонения цвета в шагах МакАдама от угла излучения светодиода

2) Светодиодная лампа Gauss Filament A60

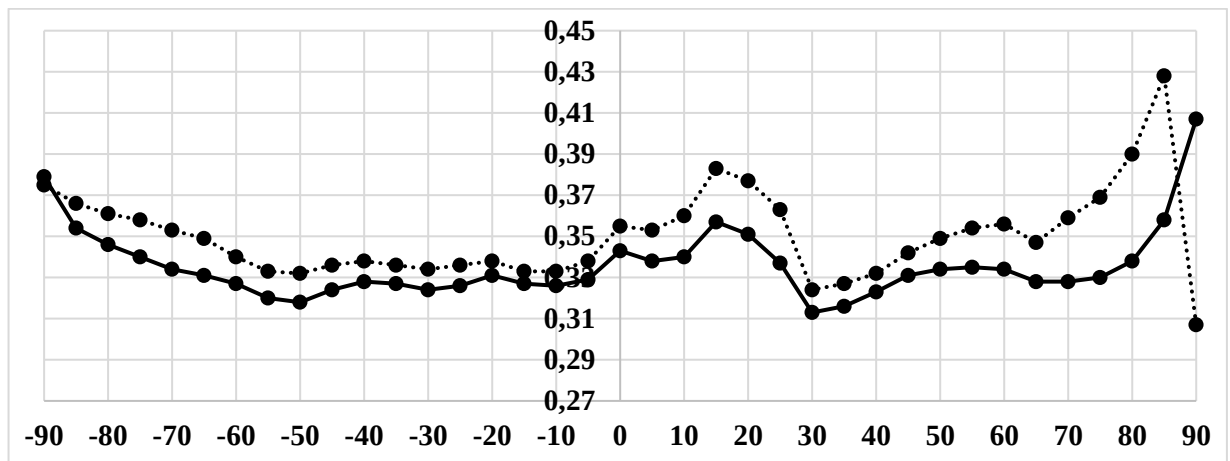


Рисунок 3.16 – Зависимость координат цветности X от угла излучения светодиодного источника света

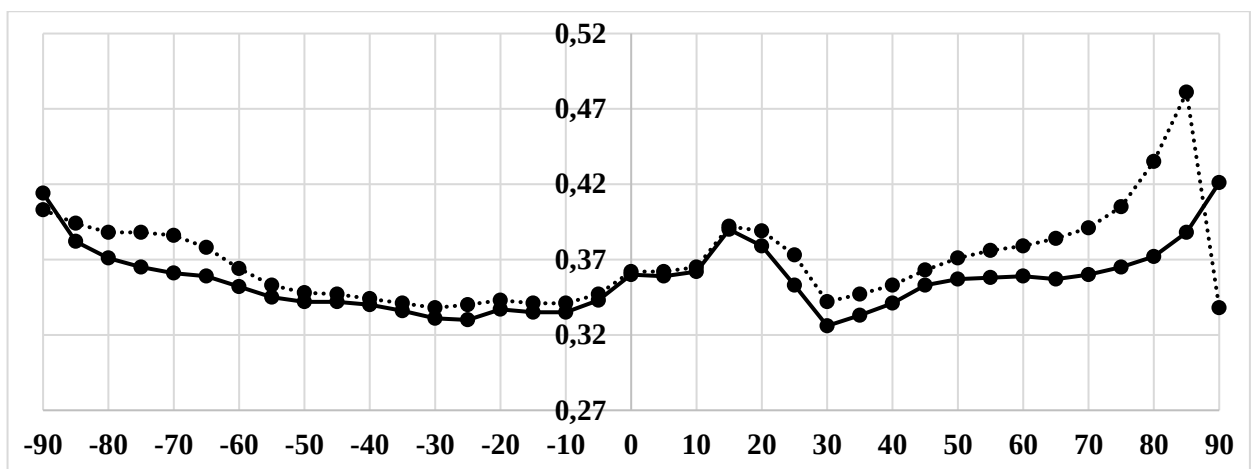


Рисунок 3.17 – Зависимость координат цветности Y от угла излучения светодиодного источника света

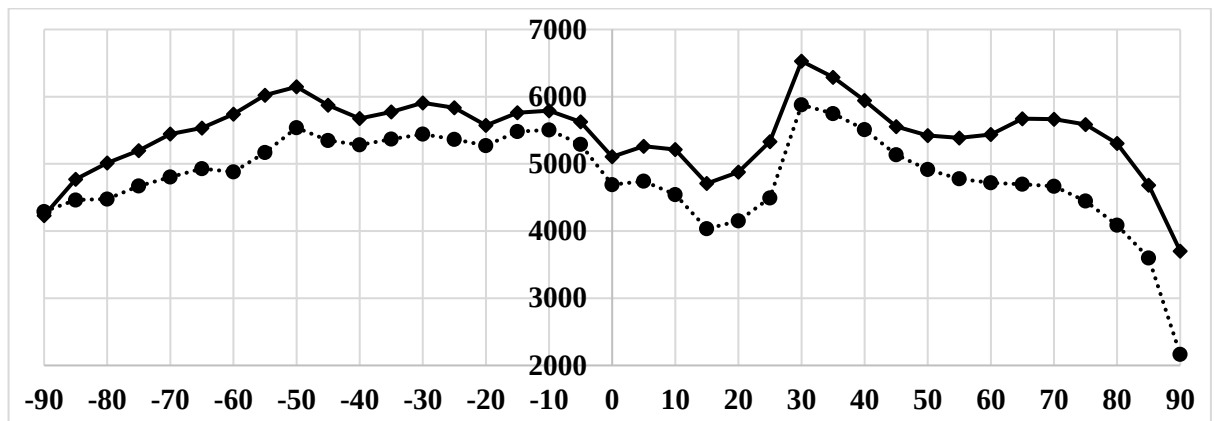


Рисунок 3.18 – Зависимость КЦТ от угла излучения светодиодного источника света

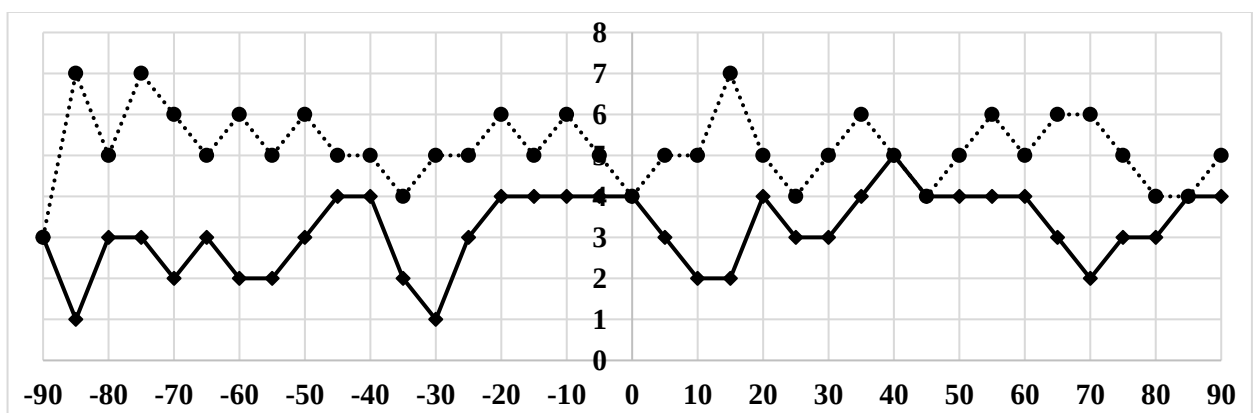


Рисунок 3.19 – Зависимость отклонения цвета в шагах МакАдама от угла излучения светодиодного источника света

3) Светодиодная лампа OSRAM LSCLA150

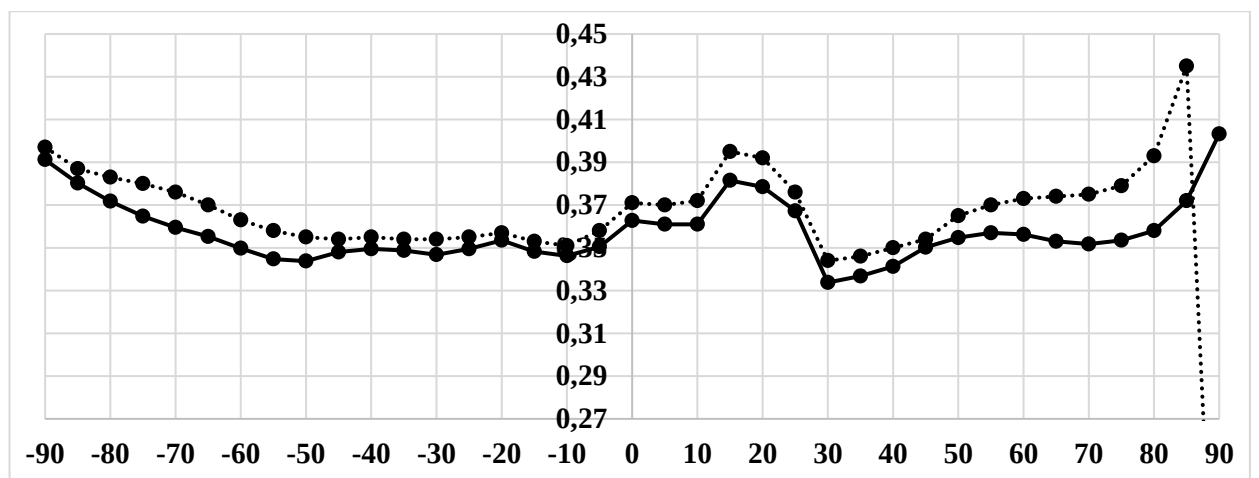


Рисунок 3.20 – Зависимость координат цветности X от угла излучения светодиодного источника света

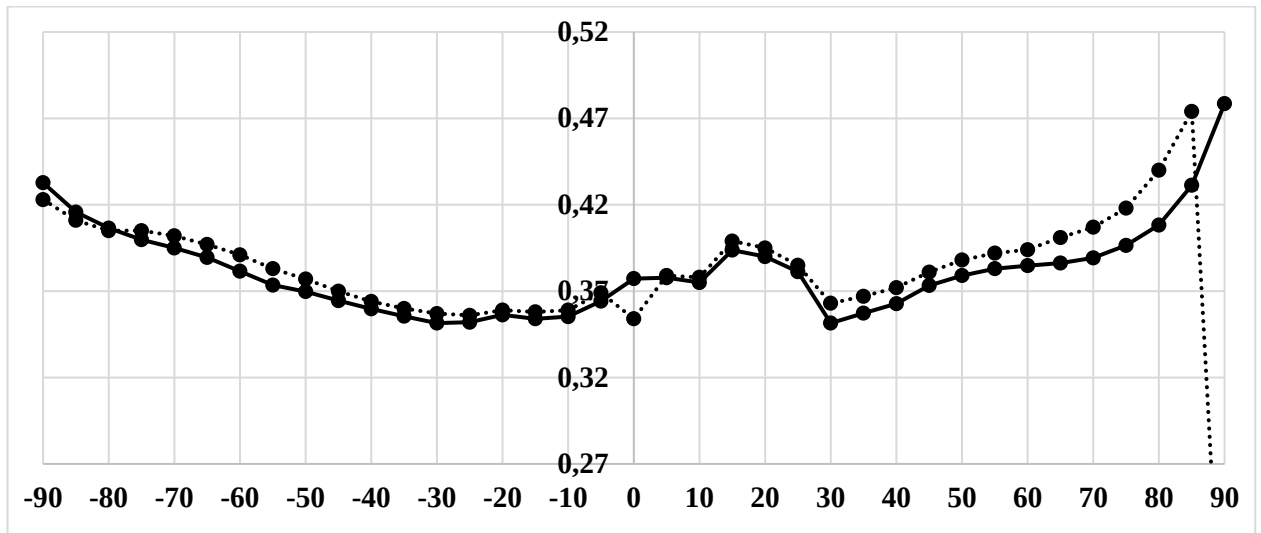


Рисунок 3.21 – Зависимость координат цветности Y от угла излучения светодиодного источника света

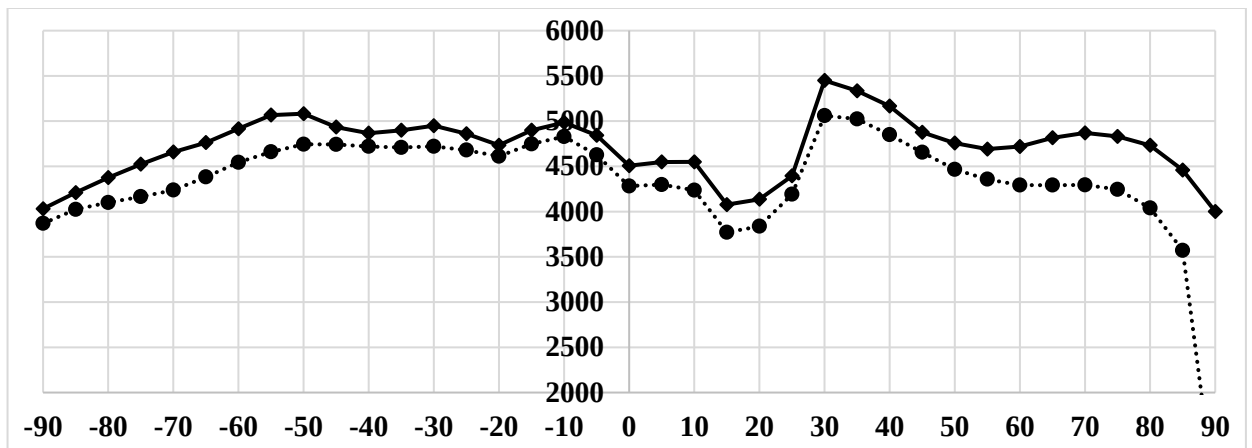


Рисунок 3.22 – Зависимость КЦТ от угла излучения светодиодного источника света

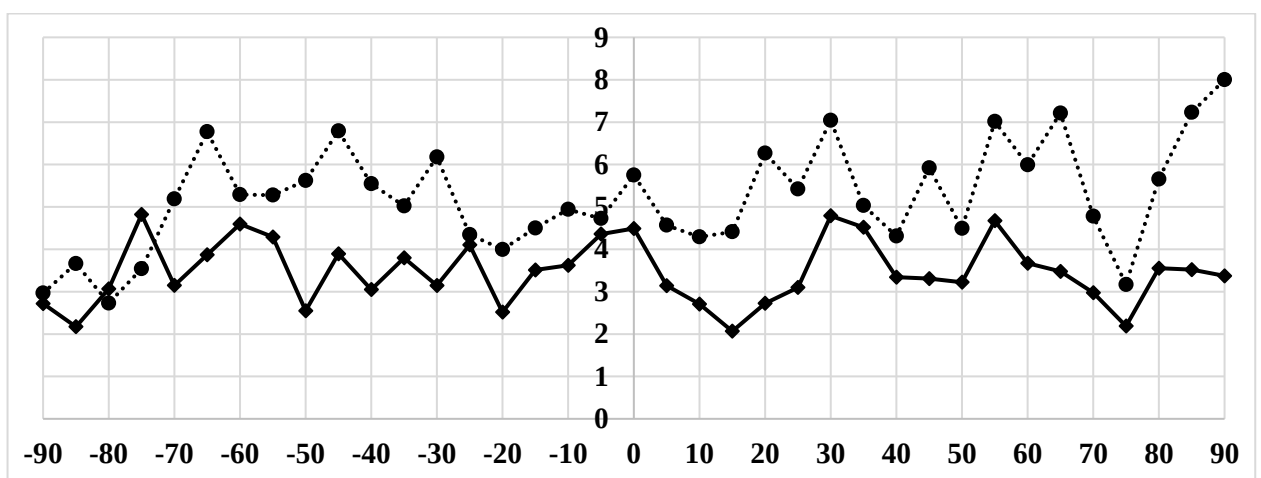


Рисунок 3.23 – Зависимость отклонения цвета в шагах МакАдама от угла излучения светодиодного источника света

Таким образом, в ходе экспериментов установлена эффективность предложенной методики введения диффузанта в люминофорную композицию. Положительные результаты, полученные при использовании как экспериментальных образцов, так и зарубежных аналогов, свидетельствуют об универсальности и воспроизводимости разработанного метода. Зафиксированное в обоих случаях снижение цветового отклонения до 2 шагов МакАдама подтверждает корректность предложенного подхода и обосновывает возможность его применения для различных типов люминофорных систем.

3.3 Новый процесс термической полимеризации люминофорной композиции в технологии изготовления светодиода

В настоящем разделе предлагается новый технологический процесс термической полимеризации люминофорной композиции, а именно применение технологии гравитационного осаждения частиц.

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.

Для эксперимента были залиты 40 синих светодиодов. На светодиоды наносилась люминофорная композиция, состоящая из желтого люминофора (12%), красного (1,5%) и связующего компаунда [157].

После заливки, 20 образцов светодиодов оставили для полимеризации в исходной ориентации, тогда как для 20 оставшихся экземпляров использовали технологию гравитационного осаждения частиц. Образцы выдерживали в течение 24 часов для завершения процесса полимеризации.

1) Измерение координат цветности в пространстве.

Данные по значениям светового потока представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты измерений

Тип сушки	Φ, лм	Тип сушки	Φ, лм
перевернутая	3,7±10%	обычная	2,1±10%
перевернутая	6,1±10%	обычная	1,9±10%
перевернутая	4,2±10%	обычная	2,3±10%
перевернутая	4,5±10%	обычная	2,5±10%
перевернутая	4,5±10%	обычная	2,3±10%
перевернутая	5,4±10%	обычная	2,1±10%
перевернутая	4,5±10%	обычная	1,9±10%
перевернутая	3,6±10%	обычная	1,8±10%
перевернутая	4,2±10%	обычная	2,4±10%
перевернутая	3,9±10%	обычная	2,2±10%
перевернутая	3,7±10%	обычная	2,3±10%
перевернутая	2,7±10%	обычная	1,9±10%
перевернутая	2,4±10%	обычная	2,0±10%
перевернутая	2,7±10%	обычная	2,2±10%
перевернутая	2,7±10%	обычная	1,8±10%
перевернутая	4,3±10%	обычная	1,9±10%
перевернутая	4,2±10%	обычная	1,9±10%
перевернутая	4,3±10%	обычная	2,1±10%
перевернутая	3,1±10%	обычная	1,8±10%
перевернутая	3,1±10%	обычная	1,7±10%

На рисунках 3.24-3.26 показаны характеристики светодиодов при гравитационном осаждении частиц и без его использования. Пунктирной линией указаны исходные значения характеристик, сплошной – при гравитационном осаждении частиц.

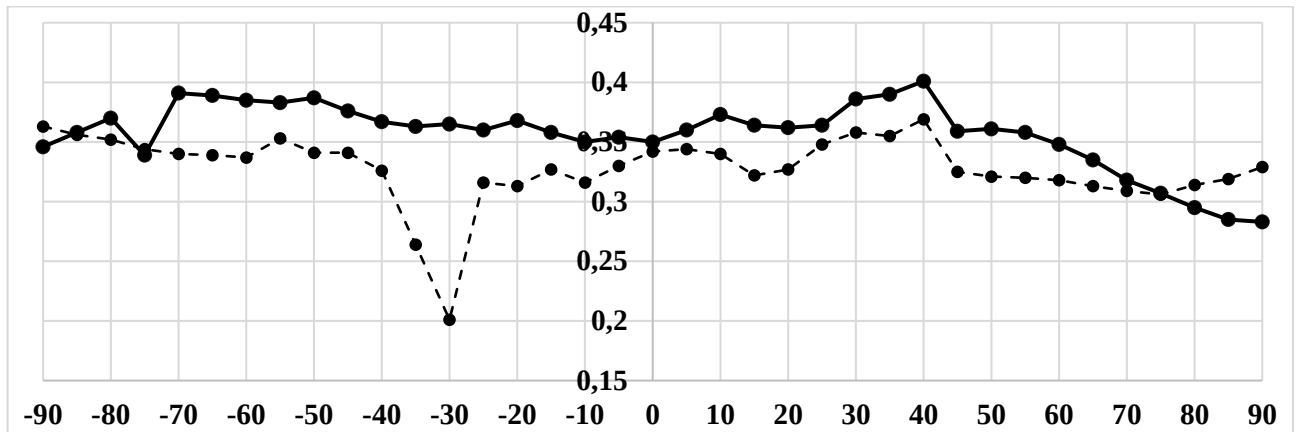


Рисунок 3.24 – Зависимость координат цветности X от угла излучения

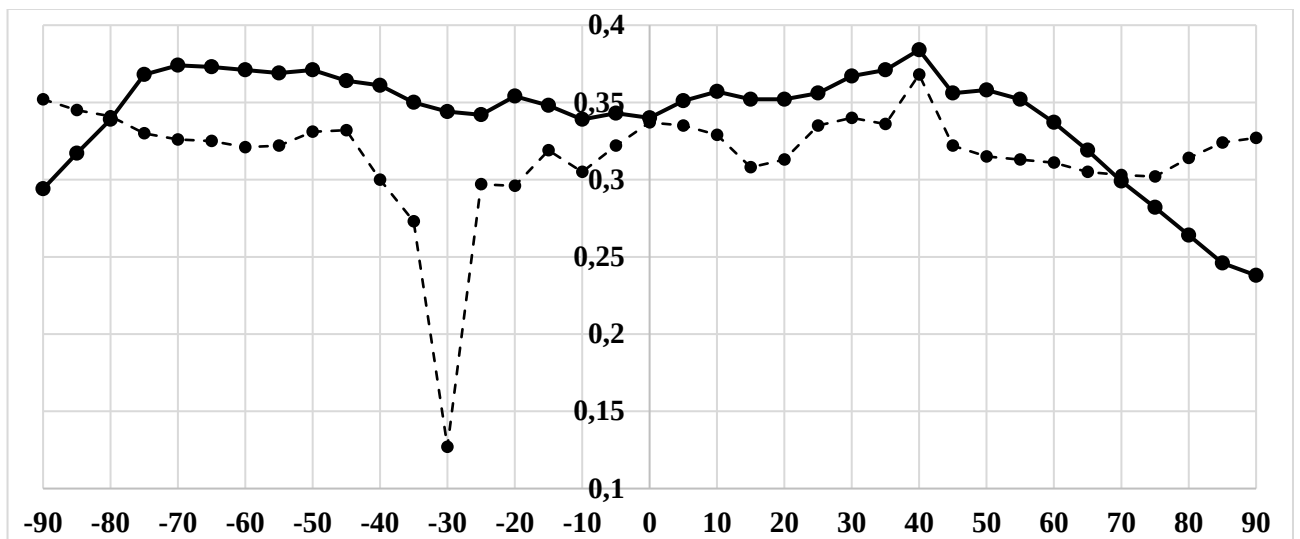


Рисунок 3.25 – Зависимость координат цветности Y от угла излучения

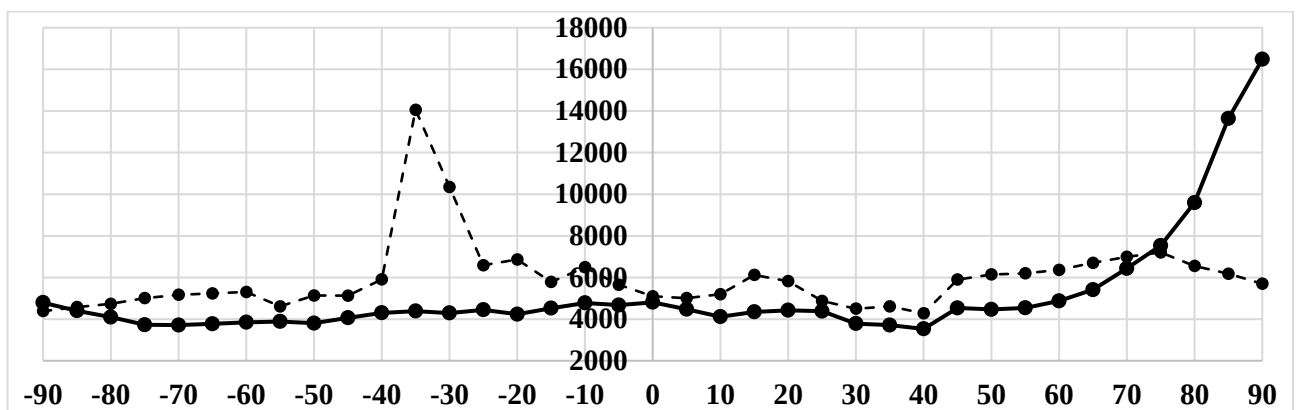


Рисунок 3.26 – Зависимость коррелированной цветовой температуры от угла излучения

На графике коррелированной цветовой температуры видно, что при гравитационном осаждении частиц значения находятся в интервале от 4500 до 5000 К. При использовании метода гравитационного осаждения частиц наблюдается повышение равномерности коррелированной цветовой температуры.

2) Применение метода математической статистики.

Графики координат цветности состоят из $n = 37$ точек, шаг по углу α составляет 5° . Решение уравнения (2.8), используя значения углов и координаты цветности графиков рисунков 3.13-3.14, дают коэффициенты

для координаты x :

$$\begin{aligned}\beta_{0x} &= 3,58 \cdot 10^{-1}; \\ \beta_{1x} &= -4,137 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-2}; \\ \beta_{2x} &= -1,6 \cdot 10^{-10} \text{ град}^{-4},\end{aligned}$$

для координаты y :

$$\begin{aligned}\beta_{0y} &= 3,39 \cdot 10^{-1}; \\ \beta_{1y} &= -5,738 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-2}; \\ \beta_{2y} &= 3,145 \cdot 10^{-11} \text{ град}^{-4},\end{aligned}$$

Соответственно, получим аппроксимирующие выражения для координат x и y .

$$\begin{aligned}x_{norm}(\alpha) &= 3,58 \cdot 10^{-1} - 4,137 \cdot 10^{-6} \alpha^2 - 1,6 \cdot 10^{-10} \alpha^4 \\ y_{norm}(\alpha) &= 3,39 \cdot 10^{-1} - 5,738 \cdot 10^{-6} \alpha^2 + 3,145 \cdot 10^{-11} \alpha^4\end{aligned}$$

Средняя ошибка аппроксимации для выражений (2.11) и (2.12) составляет

$$\begin{aligned}\eta_{\text{polynomial } x} &= 5,3\% \\ \eta_{\text{polynomial } y} &= 5,5\%\end{aligned}$$

3) Проведение расчета отклонения цвета в шагах МакАдама в каждой точке конкретной плоскости, и по всем плоскостям.

График отклонения цвета светодиода в шагах МакАдама в пространстве представлен на рисунке 3.27. Пунктирной линией на нем указаны значения характеристик без применения гравитационного осаждения частиц, сплошной – при гравитационном осаждении частиц.

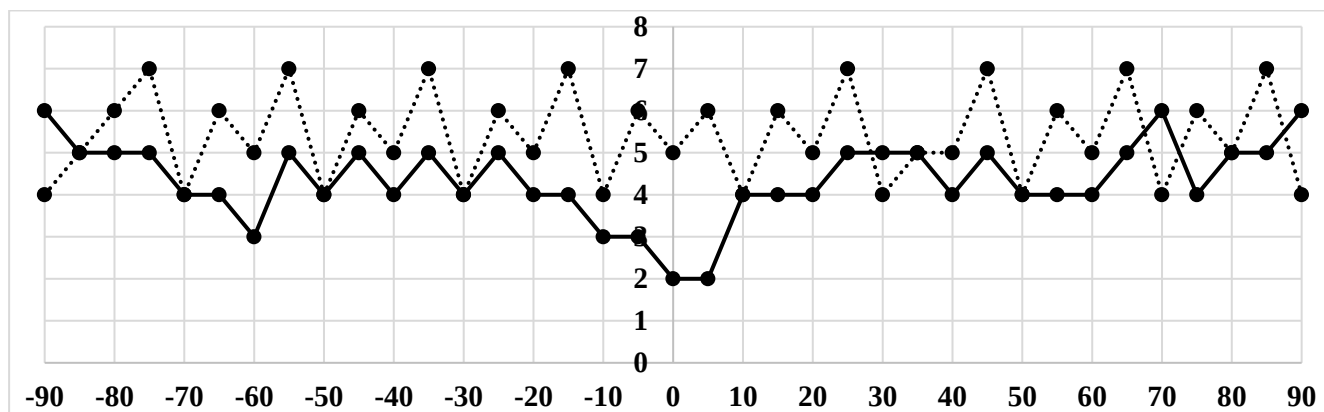


Рисунок 3.27 – График отклонения цвета в пространстве в шагах МакАдама

Как видно по графику, отклонение цвета уменьшается в среднем на 2 шага МакАдама [155].

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 новизной и защищен патентом на изобретение [158].

3.4 Выводы по главе 3

В данном разделе рассматривалось применение метода, разработанного в разделе 2 на светодиоде и светодиодном источнике света. В люминофорную композицию рассматриваемых оптических приборов был добавлен диффузант. Слой компаунда с диффузантом служит для дополнительного перемешивания излучений кристалла и люминофора, что позволяет получить равномерное распределение КЦТ в пространстве над излучающей поверхностью светодиода и светодиодного излучающего элемента.

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

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.

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

CIE	Commission Internationale de l'Éclairage
CRI	Color Rendering Index
ITO	Indium Tin Oxide
MOCVD	Metalorganic chemical vapour deposition
SDCM	Standard Deviation of Color Matching
SMD	Surface-Mount Device
TCO	Transparent Conductive Oxides
UCS	Uniform Color Space
ИАГ	Иттрий-алюминиевый гранат
КЦТ	Коррелированная цветовая температура
МКО	Международная комиссия по освещению
ОП	Осветительные приборы
СИД	Светоизлучающий диод

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Феоктистова Т.Г. Безопасность жизнедеятельности. Производственная санитария и гигиена труда. Часть 2. Защита от производственных излучений / Т.Г. Феоктистова, О.Г. Феоктистова, Т.В. Наумова; Московский государственный технический университет гражданской авиации. – М.: МГТУ ГА, 2007. – 112 с. – Текст: непосредственный.

2 СТО.69159079-05-2020 Приборы осветительные светодиодные. Требования к комфортной цветовой среде: стандарт организации: издание официальное : утвержден и введен в действие решением внеочередного общего собрания членов Ассоциации Производителей Светодиодов и Систем на их основе (АПСС) от 19 октября 2020 г. : введен впервые : дата введения 2020-12-01 – М.: АПСС, 2020. – 76 с. – Текст: непосредственный.

3 Шуберт Ф. Светодиоды. / Ф. Шуберт; [перевод с английского под ред. А.Э. Юновича]. 2-е изд.– М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008 – 496 с. – Текст: непосредственный.

4 Домасев М. В. Цвет, управление цветом, цветовые расчеты и измерения. / М.В. Домасев, С.П. Гнатюк. – СПб.: Питер, 2009. – 224 с. – Текст: непосредственный.

5 Джадд Д. Цвет в науке и технике / Д. Джадд, Г. Вышецки. – М.: Мир, 1978. – 592 с. – Текст: непосредственный.

6 MacAdam D.L. Visual sensitivities to color differences in daylight / D.L. MacAdam – DOI: 10.1364/JOSA.32.000247 // Journal of the Optical Society of America. – 1942. – №.32(5). – P. 247-274.

7 ГОСТ Р 56228-2014. Освещение искусственное. Термины и определения. Использование и издательское оформление = Lighting installations. Terms and definitions: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11 ноября 2014 г. № 1564-ст: введен впервые: дата введения 2015-07-01 / разработан Обществом с ограниченной ответственностью «Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский

светотехнический институт им. С.И. Вавилова» (ООО «ВНИСИ). - Москва: Стандартинформ, 2015. - 16 с.

8 Teupner A. Color uniformity in spotlights optimized with reflectors and TIR lenses. / A. Teupner, K. Bergenek, R. Wirth, P. Benitez – DOI:10.1364/OE.23.00A118 // Optics Express. – 2015. – №23(3). – P. 118-123.

9 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 // ЭСиСУ. – 2018. – № 1-1. – С. 255-258.

10 Туркин А.Н. Полупроводниковые светодиоды: история, факты, перспективы / А.Н. Туркин. – Текст: непосредственный // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – № 5. – С. 28-33.

11 Иванов А.В. Энергосберегающие светильники на основе высокоярких светодиодов / А.В. Иванов, А.В. Фёдоров, С.М. Семёнов – Текст: непосредственный // Энергообеспечение и энергосбережение – региональный аспект: XII Всероссийское совещание: материалы докладов. – 2011. – С. 74-77.

12 Бугров В.Е. Оптоэлектроника светодиодов / В.Е. Бугров, К.А. Виноградова – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 174 с. – Текст: непосредственный.

13 ГОСТ 34819-2021. Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний = Light devices. Light requirements and test methods: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 января 2022 г. № 28-ст: введен впервые: дата введения 2022-07-01 / разработан Обществом с ограниченной ответственностью «Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский светотехнический институт им. С.И. Вавилова» (ООО «ВНИСИ). – Москва: Российский институт стандартизации, 2022. – 58 с.

14 Перетягин В.С. Установка для измерения и контроля параметров и характеристик светодиодов / В.С. Перетягин, А.Д. Вакуленко, Е.В. Горбунова, А.Н.

Чертов. – Текст: непосредственный // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – №4(80). – С. 158-159.

15 Колодезный Е.С. Оптические свойства квантовых точек InGaP(As) в гетероструктурах GaAs/AlGaAs/InGaP/InGaAs / Е.С. Колодезный, В.В. Андриюшкин, И.И. Новиков, А.Г. Гладышев, А.В. Бабичев, В.Н. Неведомский, Д.С. Папылев, Л.Я. Карачинский, А.Ю. Егоров. – Текст: непосредственный // Оптический журнал. – 2024. – Т.91. – №6. – С. 30-38.

16 Бородкин А.И. Характеристики источников лазерного и синхротронного излучения / А.И. Бородкин, В.Е. Бугров, Л.Я. Карачинский, Е.С. Колодезный, А.А. Петренко, А.Е. Романов, С.С. Рочас, Е.О. Тиходеева – СПб: Университет ИТМО, 2023. – 93 с. – Текст: непосредственный.

17 Полисадова Е.Ф. Рентгенофазовый анализ люминесцентной керамики YAG:Ce, синтезированной радиационным методом / Е.Ф. Полисадова, Н.В. Амбарникова, В.М. Лисицын, Е.В. Домаров. – Текст: непосредственный // Материалы XIX Международной молодежной конференции по люминесценции и лазерной физике, Иркутск, 03–07 июля 2023 года. – 2023. – С. 19-20.

18 Туркин А.Н. Нитрид галлия как один из перспективных материалов в современной оптоэлектронике. / А.Н. Туркин. – Текст: непосредственный // Компоненты и технологии. – 2011. – №5 – С. 6-10.

19 Юнович А.Э. Спектры люминесценции мощных светодиодов на основе нитрида галлия в ультрафиолетовой и фиолетовой области спектра. / А.Э. Юнович, В.В. Волков, Л.М. Коган, А.Н. Туркин. – Текст: непосредственный // Физика и техника полупроводников. – 2018. – Т.52. – №10. – С. 1172-1176.

20 Ван Гилс М. Характеристики линейных светодиодных ламп прямой замены / М. Ван Гилс, Г. Дюринк, Я. Оденат, В.Р. Рикаерт, И.А.А. Роеландц, С. Формент, П. Ханселаер. – Текст: непосредственный // Светотехника. – 2012. – №1. – С. 37-45.

21 Смирнов С.В. Температурная зависимость спектров излучения светодиодов белого свечения на основе нитрида галлия и его твердых растворов / Смирнов С.В., Саврук Е.В., Гончарова Ю.С. – Текст: непосредственный // Доклады

Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2011. – №2(24). – С. 55-58.

22 Давыдов В.Н. Дисперсии носителей заряда в примесно-дефектных полупроводниках при совместном действии засветки и электрического поля / В.Н. Давыдов, Гребенников А.С., Егорова И.А. – Текст: непосредственный // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2011. – №2(24). – С. 36-45.

23 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 – DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-9-741-749. – Текст: непосредственный // Изв. вузов. Приборостроение. – 2023. – Т. 66. – № 9. – С. 741-749.

24 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. – Текст: непосредственный // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2024. – № 1 (146). – С. 4–18.

25 Коротько Г.Ф. Физиология человека / Г.Ф. Коротько [под редакцией В.М. Покровского]. – М: Медицина, 2007. – 656 с. – Текст: непосредственный.

26 ГОСТ Р 70973-2023. Оптика и фотоника. Оптика физическая. Термины, определения и буквенные обозначения основных величин = Optics and photonics. Physical optics. Terms, definitions and letter designations of basic quantities: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 октября 2023 г. № 1071-ст: введен впервые: дата введения 2024-03-01 / разработан Федеральным государственным унитарным предприятием «Научно-исследовательский институт физической оптики, оптики лазеров и информационных оптических систем Всероссийского научного центра «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова» (ФГУП «НИИФООЛИОС ВНИЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова»)). – Москва: Российский институт стандартизации, 2023. – 36 с. – Текст: непосредственный.

27 СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий: санитарные правила и нормы Российской Федерации: издание официальное: утвержден Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации, Первым заместителем министра здравоохранения Российской Федерации Г.Г. Онищенко 6 апреля 2003 г.: введен в действие постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 8 апреля 2003 г. № 34 с 15 июня 2003 г. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 23 апреля 2003 г., регистрационный номер 4443: введен впервые: дата введения 2003-06-15 / разработаны Российской медицинской академией последипломного образования (Г.Е. Бобкова); Научным центром здоровья детей РАМН (Л.М. Текшева); Научно-исследовательским институтом экологии человека и гигиены окружающей среды им. А.Н. Сысина (Ю.Д. Губернский, Н.В. Калинина); Центром госсанэпиднадзора в г. Москве (С.Г. Фокин, В.С. Черный); Научно-исследовательским институтом строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (И.А. Шмаров, В.А. Земцов). – 27 с. – Текст: непосредственный.

28 Гусев Н.М. Световая архитектура / Н.М. Гусев, В.Г. Макаревич – М.: Стройиздат, 1973. – 248 с. – Текст: непосредственный.

29 Akashi Y. CIE 227:2017 Lighting for Older People and People with Visual Impairment in Buildings. / Y. Akashi, Y. Akizuki – Standard by Commission Internationale de L'Eclairage, 2017 – 75 p.

30 Миронова Л.Н. Цветоведение. Промышленное искусство. Монументально-декоративное искусство. / Л.Н. Миронова. – Минск: Вышэйшая школа, 1984. – 286 с. Текст: непосредственный.

31 Иттен И. Искусство цвета. / И. Иттен – М.: Изд. Д. Аронов, 2001. – 95 с. – Текст: непосредственный.

32 Elliot A. Color psychology: effects of perceiving color on psychological functioning in humans / A. J Elliot, M. A Maier // Annual review of psychology. – 2013. – P. 95-120.

33 Fairchild Mark D. CIE 015:2018. Colorimetry, 4th Edition. / Mark D. Fairchild – Vienna: International Commission on Illumination, 2018.– 111 p.

34 СП 52.13330.2016. Свод правил. Естественное и искусственное освещение = Daylighting and artificial lighting: свод правил Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 7 ноября 2016 г. N 777/пр: дата введения 2017-05-08 / подготовлен к утверждению Департаментом градостроительной деятельности и архитектуры Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России). – Москва: Стандартинформ, 2017. – 89 с. – Текст: непосредственный.

35 Smith T. The C.I.E. colorimetric standards and their use. / T. Smith, J. Guild – DOI:10.1088/1475-4878/33/3/301 // Transactions of the Optical Society. – 1931. – Vol. 33 (3). – P. 73-134.

36 Горбунова Е.В. Колориметрия. Часть 1: Цветное зрение и основы расчетов цвета источников излучения. / Е.В. Горбунова, Е.А. Сычева, А.Н. Чертов. – СПб: Университет ИТМО, 2021 – 63 с. – Текст: непосредственный.

37 Келли Джордж. Теория цвета и успешное применение светодиодов. Часть 2 / Джордж Келли. – Текст: непосредственный // Полупроводниковая светотехника. – 2013. – № 5. – С. 85-88.

38 Wood A. Thomas Young, Natural Philosopher: 1773-1829.; / A. Wood. – Completed by Frank Oldham. Cambridge Univ. Press, New York, 1954. – 355 p.

39 Lowengard S. The Creation of Color in 18th-Century Europe / S. Lowengard // Columbia University Press. – 2008. – P. 1-29.

40 Ансимова Е.В. Колористика / Е. В. Ансимова, О. В. Фирсанова. – Текст: электронный // Электронная библиотека УрГПУ – 2020. – URL: <http://elar.rsvpu.ru/978-5-8050-0701-0> (дата обращения: 24.05.2023).

41 Малых А. Е. Герман Грассман и его учение о протяженности / А. Е. Малых, Ю. Н. Челпанова. – Текст: непосредственный // Вестник Пермского университета. Серия: Математика. Механика. Информатика – 2013. – № 2(21). – С. 105-109.

42 Grassman H. Zur Theorie der Farbenmischung / H. Grassmann – DOI: 10.1002/andp.18531650505 // Annalen der Physik und Chemie. – 1853. – Vol. 165(5). – P. 69-84.

43 Stevenson, Scott. University of Houston Vision OPTO 5320 Vision Science 1 Lecture Notes / Scott Stevenson. – Текст: электронный // University of Houston. – 2018. – URL: <https://www.researchgate.net/profile/Scott-Stevenson-2> (дата обращения: 24.05.2023).

44 Brewster D., MacAdam David L. Contributions to color science. / D. Brewster, David L. MacAdam – NIST Research Library, 1979. – 778 p.

45 Pauli H. Proposed extensions of the CIE recommendation on «Uniform color spaces, color difference equations, and metric color terms» / H. Pauli // Journal of the Optical Society of America. – 1976. – Vol 66(8). – P. 866-867.

46 ISO/CIE 11664-6:2022. Colorimetry – Part 6: CIEDE2000 color-difference formula. – Geneva: ISO, 2022. — 7 p.

47 CIE 015:2018. Colorimetry, 4th Edition. – Vienna: Commission Internationale de l'Éclairage, 2018. – 82 p.

48 Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений. Издание 3-е, исправленное и дополненное / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – Москва: Техносфера, 2012. – 1104 с. Текст: непосредственный.

49 ISO/CIE 11664-5:2016. Colorimetry – Part 5: CIE 1976 L^*u^*v (CIELUV) and $u'v'$ chromaticity diagram. – Geneva: International Organization for Standardization, 2016. – 14 p.

50 M.R. Luo. Chromaticity-discrimination ellipses for surface colours / Luo, M.R., Rigg, B. // Color Research & Application. – 1986. – Vol. 11(1). – P. 25–42.

51 Wyszecki, G. Color Science: Concepts and Methods. / G. Wyszecki, W.S. Stiles. 2nd ed. – New York: Wiley, 1982. – 950 p.

52 Schanda, J. Colorimetry: Understanding the CIE System. / J. Schanda, – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2007. – 496 p.

53 Sharma, G. The CIEDE2000 color-difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations / G. Sharma, W. Wu, E. N. Dalal // Color Research & Application. – 2005. – Vol. 30, No. 1. – P. 21-30.

54 CIE 116-1995. Industrial colour-difference evaluation. – Vienna: CIE, 1995. – 17 p.

55 CIE 015:2018. Colorimetry. – Vienna: CIE, 2018. – 113 p.

56 CIE 142:2001. Improvement to industrial colour-difference evaluation. — Vienna: CIE, 2001. – 15 p.

57 IEC 61966-4:2020 Multimedia systems and equipment – Colour measurement and management – Part 4: Equipment using liquid crystal display panels. – International Electrotechnical Commission, 2000. – 13 p.

58 ГОСТ Р 71216 – 2024. Материалы лакокрасочные. Колориметрия. Измерение цвета. Расчет цветовых различий и индекса метаматерии. = Coating materials. Colorimetry. Color measurement. Calculation of color differences and metamerism index: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 24 января 2024 г. № 54-ст: взамен ГОСТ Р 52489—2005 (ИСО 7724— 1:1984), ГОСТ Р 52662—2006 (ИСО 7724— 2:1984), ГОСТ Р 52490—2005 (ИСО 7724— 3:1984): дата введения 2024-04-01 / разработан Закрытым акционерным обществом «Научно-производственная компания ЯрЛИ» (ЗАО «НПКЯрЛИ»). – Москва: Российский институт стандартизации, 2024. – Текст: непосредственный.

59 IEC 60081:2002, Annex B. Single-capped fluorescent lamps – Performance specifications. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2002. – 364 p.

60 Все о SDCM для светодиодных лент. – Текст: электронный // Официальный сайт SignliteLED [сайт] – URL: <https://www.signliteled.com/ru/all-about-sdcm-for-led-strip-lights/> , (дата обращения 27.11.2024).

61 Wyszecki G. Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae / G. Wyszecki, W.S. Stiles. 2nd ed. – New York: Wiley, 1982. – 950 p.

62 Буда́к В.П. Изменение эллипсов МакАдама с учётом адаптации / В.П. Буда́к, Р.А. Де́лян. – Текст: непосредственный // Светотехника. – 2023. – №2. – С. 66-69.

63 Бе́ляева Н.М., Построение равноконтрастной системы для определения цветовых соотношений в архитектурных интерьерах: специальность 05.00.00 «Технические науки»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бе́ляева Ната́лия Миха́йловна; Научно-исследовательский институт строительной физики. – Москва, 1972. – 179 с. – Текст: непосредственный.

64 Матвеев А.Б. Равноконтрастная цветовая система / А.Б. Матвеев, Н.М. Бе́ляева. – Текст: непосредственный // Светотехника. – 1965. – №9. – С. 1-6.

65 Ива́нов, В.Г. Колориметрия в СССР: 1970–1990 / В.Г. Ива́нов. — М.: Научная книга, 2005. — 240 с. – Текст: непосредственный.

66 Буда́к В.П. Сравнительный анализ моделей цветового восприятия для реалистической визуализации в программах глобального освещения / В.П. Буда́к, И.Р. Га́ллямов, Д.А. Ки́селев. – Текст: непосредственный // ГрафиКон 2023: 33-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению. – 2023. – С. 116-124.

67 Sharma G. The development of the CIE 2000 colour-difference formula. / G. Sharma, M.R. Luo, G. Cui – DOI: 10.1002/col.1049 // Color Research & Application. – 2001. – №26(5). – P. 340-350.

68 Ronnier Luo M. (2020). Color difference formulas: Past, present and future. / M. Ronnier Luo – DOI:10.1002/col.22486 // Color Research & Application. – 1999. – №45(3), – P. 350–366.

69 ANSI_NEMA_ANSLG C78.377-2008. Specifications for the Chromaticity of Solid State Lighting Products. – American National Standard Lighting Group, 2008. – 19 p.

70 CIE 178:2007. Proceedings of the 26th Session of the CIE — Beijing, China, 4 – 11 July 2007. Conference Proceeding by Commission Internationale de L'Eclairage, 07/11/2007.

71 Jaehyeok P. Comparative Study on Temperature-Dependent Internal Quantum Efficiency and Light-Extraction Efficiency in III-Nitride-, III-Phosphide-, and III-Arsenide-based Light-Emitting Diodes / P. Jaehyeok, S. Seokjun, Z. Dong-Guang, Kyu Sang Kim, Dong-Pyo Han // *Ceramist*. – 2025. – Vol. 28, No. 1. – P. 134-149.

72 Zhao S.R. Chapter One - III-nitride nanostructures: Selective area epitaxy, surface emitting lasers, and emerging photodetectors / S.R. Zhao, Z.T. Mi, H.H. Tan (eds.). // *Semiconductors and Semimetals* – Elsevier. – 2024. – Vol. 116. – P. 1-23.

73 Yam F.K. InGaN: An overview of the growth kinetics, physical properties and emission mechanisms / F.K. Yam, Z. Hassan // *Superlattices and Microstructures*. – 2008. – Vol. 43(1). – P. 1-23.

74 Taniyasu Y. An aluminium nitride light-emitting diode with a wavelength of 210 nanometres / Y. Taniyasu, M. Kasu, T. Makimoto – DOI: 10.1038/nature04760 // *Nature*. – 2006. – Vol. 441. – P. 325-328.

75 Zhen Chen. MicroLED technologies and applications: characteristics, fabrication, progress, and challenges / Zhen Chen, Shuke Yan, D. Cameron – DOI: 10.1088/1361-6463/abcfe4 // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2024. – Vol. 54(12). – P. 1-35.

76 Krames Michael R. Status and Future of High-Power Light-Emitting Diodes for Solid-State Lighting / Michael R. Krames, O.B. Shchekin, R. Mueller-Mach, G.O. Mueller, Ling Zhou, G. Harbers, M. George Craford // *Journal of display technology*. – 2007. – Vol. 3(2). – P. 160-175.

77 Федоров П.И. Галлия арсенид / П.И. Федоров. – М.: Советская энциклопедия, 1988. – 623 с. – Текст: непосредственный.

78 Радауцан С.И. Фосфид галлия. / С.И. Радауцан, Ю.И. Максимов, В.В. Негрескул, С.Л. Пышкин – Кишинев, 1969. – 123 с. – Текст: непосредственный.

79 Shionoya S. Luminescence of wide bandgap II-VI compounds — past, present, and future / S. Shionoya // *Annual Meeting Optical Society of America, Technical Digest Series*. – 1989. – P. 1.

80 Bai R.F. Progress in blue colloidal quantum dots for display applications / R.F. Bai, C.H. Wang (et al.) // Journal of Information Display. – 2025. – Vol. 26(2). – P. 95-107.

81 Конструкция светодиодов [сайт]. – URL: <https://центртехническогосвета.пф/prosvet/stati/konstruktsiya-svetodiodov/> (дата обращения: 22.05.2024). – Текст: электронный.

82 High CRI LED Lighting [сайт]. – URL: <https://www.yujiintl.com/high-cri-led-lighting/> (дата обращения: 22.05.2024). – Текст: электронный.

83 ГОСТ Р 54350-2015. Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний = Light devices. Light requirements and test methods: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 6 мая 2015 г. N 348-ст: ВЗАМЕН ГОСТ Р 54350-2011: дата введения 2016-01-01/ разработан Обществом с ограниченной ответственностью "Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский светотехнический институт им.С.И.Вавилова" (ООО "ВНИСИ"). – Москва: Стандартинформ, 2015. – Текст:непосредственный.

84 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.

85 Вейнерт Д. Светодиодное освещение: принципы работы, преимущества и области применения. Справочник / Д. Вейнерт, Ч. Сполдинг – Philips Solid-State Lighting Solutions, Inc, 2010. – 156 с. – Текст: непосредственный.

86 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.

87 Андреева, М.В. Исследование влияния термоэлектрической нагрузки на надёжность светодиодного излучающего элемента / М.В. Андреева, А.А.

Максименко. – Текст: непосредственный // Актуальные проблемы современной науки. – 2019. – С. 62-64.

88 Cui Y. Flexible thermal interface based on self-assembled boron arsenide for high-performance thermal management / Y. Cui, Z. Qin, H. Wu [et al.] – DOI 10.1038/s41467-021-21531-7 // Nature Communications. – 2021. – Vol. 12, No. 1. – P. 1-7.

89 Туманов А.Т. Компаунды электроизоляционные. Энциклопедия современной техники. Конструкционные материалы. Том 1 (Абляция – Коррозия) / А.Т. Туманов – М.: Советская энциклопедия, 1963 – 418 с. Текст: непосредственный.

90 Юшин А.М. Современные светодиоды: справочник / А.М. Юшин – М.: ИП РадиоСофт, 2013 – 384 с. Текст: непосредственный.

91 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.

92 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.

93 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.

94 Рудаков С.В. Светодиодные осветительные приборы / С.В. Рудаков, А.В. Синянский. – М.: Издательский дом «Светотехника», 2011.

95 Суэтс К.Ф. Основы тепло- и массопереноса / К.Ф. Суэтс, Дж.А. Уивер. – 6-е изд. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2007

96 Schubert E.F. Light-Emitting Diodes / E.F. Schubert. 3rd ed. – Cambridge : Cambridge University Press, 2018. – 424 p.

97 CIE 234:2019. "LED Lighting for Ancient Buildings, Monuments and Museums". – Vienna: International Commission on Illumination, 2019. – Section 4.2.2: Thermal management in linear LED fixtures

98 Shaolin Hu. A novel MOCVD reactor for growth of high-quality GaN-related LED layers / Shaolin Hu, Sheng Liu, Zhi Zhang, Han Yan, Zhiyin Gan, Haisheng Fang // Journal of Crystal Growth – 2015 – Vol. 415. – P. 72-77.

99 Жуков А.А. Нанотехнологии в светодиодах и светодиодных системах освещения / А.А. Жуков, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов. – Текст: непосредственный // Физика и техника полупроводников. – 2016. – Т. 50, вып. 2. – С. 145-157.

100 Казанкин О.Н. Неорганические люминофоры / О.Н. Казанкин, Л.Я. Марковский, И.Я. Миронов, Ф.М. Пекерман, Л.М. Петошина – Ленинград: Химия, 1975. – 193 с. – Текст: непосредственный.

101 Заливочные компаунды [сайт]. – URL: https://giga-tools.ru/shop/CID_694_1.html?v=&f=2&s=1 (дата обращения 23.05.2024). – Текст: электронный.

102 Штейб Х.В. Справочник по люминофорам / Под ред. Х.В. Штейба. – М.: Энергоиздат, 1982. – 516 с. – Текст: непосредственный.

103 Прохоров А.М. Физическая энциклопедия. Т.5 Стробоскопические приборы – Яркость / А.М. Прохоров. – М.: БРЭ, 1998. – 687 с. – Текст: непосредственный.

104 Гурвич А.М. Введение в физическую химию кристаллофосфоров / А.М. Гурвич – М.: Высшая школа, 1982. – 376 с. – Текст: непосредственный.

105 Девярых Э.В. Люминесцентные лампы. Люминофоры и люминофорные покрытия. / Э.В. Девярых, В.Ф. Дадонов – Саранск: Издательство Мордовского университета, 2007 – 344 с. – Текст: непосредственный.

106 Казанкин О.Н., Марковский Л.Я., Миронов И.А. Неорганические люминофоры. / О.Н. Казанкин, – Москва: Химия, 1975 – 192 с. – Текст: непосредственный.

107 Hao Wu. Three-band white light from InGaN-based blue LED chip precoated with green/red phosphors / Hao Wu, X. Zhang, C. Guo // IEEE Xplore. – 2015. – P. 125-128.

108 Pratik Dinesh Baheti. Blue LED (InGaN)-driven yellow and red emitting phosphor for white light generation / P. D. Baheti, R. A. Talewar, S. Moharil // Materials Letters. – 2018. – P. 45-48.

109 Changyu Shen. White LED based on YAG: Ce,Gd phosphor and CdSe-ZnS core/shell quantum dots / C. Shen, K. Li, Qiang-long Hou, Hua-jun Feng // IEEE Photonics Technology Letters. – 2010. – P. 884-886

110 Пустоваров В.А. Люминесценция твердых тел / В.А. Пустоваров – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2017. – 128 с. – Текст: непосредственный.

111 Жиров Н.Ф. Люминофоры / Н.Ф. Жиров – М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1940 – 480 с. – Текст: непосредственный.

112 Zhu Y. Investigation of remote-phosphor white light-emitting diodes with multi-phosphor layers / Y. Zhu, N. Narendran // Japanese Journal of Applied Physics. – 2010. – Vol. 49, No. 10. – P. 100-203.

113 Huang H.T. Planar lighting system using remote-phosphor technique with blue light-emitting diodes / H.T. Huang, C.C. Tsai, Y.P. Huang // Optics Express. – 2010. – Vol. 18, No. S3. – P. A287-A295.

114 Moreno I. Designing light-emitting diode arrays for uniform near-field irradiance / I. Moreno, U. Contreras, R.I. Tzonchev // Applied Optics. – 2007. – Vol. 46, No. 12. – P. 2260-2267.

115 Nakamura S. The Blue Laser Diode: GaN Based Light Emitters and Lasers / S. Nakamura, G. Fasol. – Berlin: Springer-Verlag, 1997. – 343 p.

116 Schubert E. F. Solid-State Light Sources Getting Smart / E.F. Schubert, J.K. Kim // Science – 2005. – Vol. 308 – P. 1274-1278.

117 Tran N.T. Effect of Phosphor Particle Size on Luminous Efficacy of Phosphor-Converted White LED / N.T. Tran, J.P. You, F.G. Shi – DOI: 10.1109/JLT.2009.2028087 // Journal of Lightwave Technology. – 2009. – Vol. 27, No. 22. – P. 5145-5150.

118 Tran N.T. Effect of Phosphor Particle Size on Luminous Efficacy of Phosphor-Converted White LED / T. N. Tran, Jiun-Pyng You, F. G. Shi // Journal of Display Technology. – 2011. – P. 1-4.

119 Liu Zong-Yuan. Effects of YAG: Ce Phosphor Particle Size on Luminous Flux and Angular Color Uniformity of Phosphor-Converted White LEDs / Zong-Yuan Liu, C. Li, Bin-Hai Yu, Yao-Hao Wang // Journal of Display Technology (IEEE). – 2012. – Vol. 8, No. 6. – P. 329-335.

120 Mueller-Mach R. Power phosphors for white light emitting diodes / R. Mueller-Mach, G.O. Mueller, M.R. Krames, O.B. Shchekin // Journal of Light & Visual Environment. – 2005. – Vol. 29, No. 2. – P. 213-218.

121 Zhong P. Spatial color uniformity of white LEDs: Influence of phosphor geometry and packaging structures / P. Zhong, G. He, M. Zhang // Optics Express. – 2016. – Vol. 24(18). – P. A1253-A1262.

122 Zhu Y. Recent advances in phosphor-converted white light-emitting diodes: packaging, materials, and mechanisms / Y. Zhu, Z. Zhang, S. Wang // Science China Materials. – 2020. – Vol. 63. – P. 2175–2197.

123 Lee Kwang-Cheol. The effects of titania diffuser on angular color homogeneity in the phosphor conformal coated white LEDs / Kwang-Cheol Lee, S. M. Kim, H. A. Moon // Proceedings of SPIE (Tenth International Conference on Solid State Lighting). – 2010. – Vol. 7784. – P. 778410.

124 Liu Z. Optical analysis of color distribution in white LEDs with phosphor and remote diffuser coating / Z. Liu, S. Liu, K. Wang, X. Luo // Journal of Display Technology. – 2008. – Vol. 4, No. 1. – P. 77-81.

125 Smith H.M. High Performance Pigments / H.M. Smith (ed.). 2nd ed. – Weinheim: Wiley-VCH, 2009. – 435 p.

126 ISO 6504-1:2019. Paints and varnishes – Determination of hiding power. Part 1: Kubelka-Munk method for white and light-coloured paints. – Geneva: ISO, 2019. — 12 p.

127 Haynes W.M. CRC Handbook of Chemistry and Physics / W.M. Haynes (ed.). 102nd ed. – CRC Press, 2021. – 2643 p.

128 Baranov A. Influence of nano-sized silica fillers on the optical and rheological properties of epoxy composites for LED encapsulation / A. Baranov, S. Karpov // Journal of Applied Polymer Science. – 2015. – Vol. 132, No. 15. – P. 41835.

129 Liu R.S. Phosphors, Up Conversion Nano Particles, Quantum Dots and Their Applications / R.S. Liu (ed.). – Singapore: Springer, 2017. – 523 c.

130 Yen W.M. Phosphor Handbook / W.M. Yen, S. Shionoya, H. Yamamoto – Boca Raton: CRC Press, 2006. – 1051 p.

131 Zhu Y. Optimization of phosphor particle size for remote phosphor configuration in white LEDs / Y. Zhu [et al.] // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2015. – Vol.32, No.2. – P. 115-119.

132 Keller G. Statistics for Management and Economics / G. Keller – Belmont, Calif.: Thomson/Brooks/Cole, 2005. – 922 p.

133 Lehmann E. L. Testing Statistical Hypotheses. / E.L. Lehmann, J.P. Romano – Springer, 2005. – 794 p.

134 Draper N. R. Applied Regression Analysis. / N.R. Draper, H. Smith – Wiley, 1998. – 736 p.

135 Montgomery D. C. Design and Analysis of Experiments. / D.C. Montgomery – Wiley, 2017. – 757 p.

136 Hair J. F. Multivariate Data Analysis. / J.F. Hair [et al.] – Pearson, 2018. – 834 p.

137 Gelman, A., Bayesian Data Analysis. / A. Gelman [et al.] – Chapman & Hall, 2013. – 277 p.

138 Wooldridge J.M., Introductory Econometrics, a modern approach / J.M. Wooldridge – Mason, OH: South Western, Cengage Learning, 2009. – 896 p.

139 Хайруллина, О.И. Эконометрика: базовый курс / О.И. Хайруллина, О.В. Баянова; Пермский аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова. – Пермь: ИПЦ «Прокрость», 2019 – 176 с. – Текст: непосредственный.

140 Модель множественной линейной регрессии: содержательная интерпретация и предпосылки [сайт] – URL: <https://lib.tsu.ru/mminfo/2016/Dombrovski/book/chapter-3/chapter-3-1.htm> (дата обращения 05.06.2025). – Текст: электронный.

141 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. – 2019. – С. 115-118.

142 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.

143 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.

144 Светуньков И.С. Методы социально-экономического прогнозирования / И.С. Светуньков, С.Г. Светуньков. – Т. 1. СПб: Издательство Санкт-Петербургского государственного университета экономики и финансов, 2009 – 183 с.

145 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.

146 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.

147 Andreeva M.V. Investigation of phosphor compositions for led filament bulb / V.I. Tuev, V.S. Soldatkin, M.V. Andreeva [et al.] – DOI 10.1088/1742-6596/1115/5/052012 // Journal of Physics: Conference Series, Tomsk. – 2018. – Vol. 1115. – P. 052012.

148 Андреева М.В. Оценка пространственного распределения спектроколориметрических характеристик светодиодных ламп в шагах МакАдама / М.В. Андреева, В.С. Солдаткин, В.И. Туев. – DOI: 10.17212/2782-2001-2022-3-75-88. – Текст: непосредственный // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – № 3 (87). – С.75–88.

149 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.: ил. – Текст: непосредственный.

150 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.: ил. – Текст: непосредственный.

151 Патент № 219968 Российская Федерация, МПК F21V 33/00 (2006.01). Светодиодная лампа: № 2023109005; заявл. 11.04.2023; опубл. 16.08.2023, / Андреева М.В., Солдаткин В.С., Туев В.И., Хомяков А.Ю.; заявитель ФГБОУ ВО «ТУСУР». – 7 с.: ил. – Текст: непосредственный.

152 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.: ил. – Текст: непосредственный.

153 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.: ил. – Текст: непосредственный.

154 Cree MHDGWT-0000-000NOBN250E [сайт]. – URL: <https://www.chipdip.ru/product/mhdgwt-0000-000n0bn250e-svetodiod-smd-5000k-bin-cree-led-9000567647?ysclid=mp0zsj6mg3623663317> (дата обращения 11.12.2025). – Текст: электронный.

155 OSRAM LSCLA150 [сайт]. – URL: <https://www.chipdip.ru/product/lsccla150-15w-840-230vfr-e27-lampa-svetodiodnaya-15vt-osram-9001428548?ysclid=mp0zw1058195150606>, (дата обращения 11.12.2025). – Текст: электронный.

156 Gauss Filament A60 [сайт]. – URL: https://www.vseinstrumenti.ru/product/lampa-gauss-led-filament-a60-e27-10w-930lm-2700k-102802110-942575/?utm_referrer=https://yandex.ru/ (дата обращения 11.12.2025). – Текст: электронный.

157 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.

158 Патент № 2853466 Российская Федерация, МПК H10H 20/01 (2025.01), H10H 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. – Текст: непосредственный.

ПРИЛОЖЕНИЕ А**(справочное)****Копии подтверждающих документов**

УТВЕРЖДАЮ

Директор департамента по
учебной работе
ФГАОУ ВО «ТУСУР»М.Ю. Ким
» _____ 2025 г.**АКТ**

об использовании результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.6 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы
Андреевой Марии Владимировны

Настоящим актом подтверждается использование результатов диссертационного исследования М.В. Андреевой в учебном процессе при реализации программы бакалавриата в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

Метод оценки пространственного распределения цветовых параметров в шагах МакАдама, включающий определение пространственной зависимости координат цветности, математическую обработку полученных результатов с последующим расчетом отклонения цвета в шагах МакАдама, используется для выполнения физических экспериментов бакалаврами направления подготовки 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств», профиль «Электронные технологии наземного и космического назначения».

Заместитель заведующего кафедрой
РЭТЭМ по учебной работе, доцент, к.б.н.

Н.Н. Несмелова

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «Современные
источники света»



П.Д. Колинко

2024 г.

АКТ

о практическом использовании научных результатов диссертационной
работы М.В. Андреевой

Настоящим актом подтверждается практическое использование научных результатов диссертационного исследования М.В. Андреевой на предприятии ООО «Современные источники света».

1. Методика оценки пространственного распределения коррелированной цветовой температуры светоизлучающих диодов и светодиодных излучающих элементов, основанная на применении эллипсов МакАдама.

2. Результаты анализа и рекомендации по внесению изменений в конструкцию и технологические операции производства светодиодных излучающих элементов, расположенных внутри колбы лампы, с целью уменьшения пространственной неравномерности коррелированной цветовой температуры.

Практическое использование научных результатов диссертационной работы М.В. Андреевой позволило повысить пространственную равномерность цветовых характеристик светодиодных ламп.

Главный энергетик

A handwritten signature in blue ink, likely belonging to A.I. Prudnikov, written over a horizontal line.

А.И. Прудников



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и
инновациям ФГАОУ ВО «ТУСУР»

С.П. Куксенко

«__» _____ 2025 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата
технических наук по специальности 2.2.6 – Оптические и оптико-
электронные приборы и комплексы
Андреевой Марии Владимировны

Настоящим актом подтверждаю, что результаты диссертационной работы М.В. Андреевой, а именно новые технические решения устройств с улучшенным пространственным распределением коррелированной цветовой температуры, защищенные патентами на полезные модели №193054 и №195810, использовались в Научно-исследовательском институте светодиодных технологий ТУСУР 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» (26.09.2017 – 31.12.2019). Уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI57717X0266.

Ответственный исполнитель

Доцент каф.РЭТЭМ, к.т.н.

 В.С. Солдаткин

«__» _____ 2025 г.

ЛИЦЕНЗИОННЫЙ ДОГОВОР № 25/374 (ИСКЛЮЧИТЕЛЬНАЯ ЛИЦЕНЗИЯ)

г. Томск

«30» июня 2020 года

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР), именуемое в дальнейшем «Лицензиар», в лице ректора Рулевского Виктора Михайловича, действующего на основании Устава, с одной стороны, и Общество с ограниченной ответственностью «Руслед», именуемое в дальнейшем «Лицензиат», в лице директора Капустиной Дианы Башировны, действующего на основании Устава, с другой стороны, вместе именуемые в дальнейшем Стороны, принимая во внимание, что:

1. Лицензиаром при выполнении прикладных научных исследований (ПНИ) в рамках Соглашения о предоставлении субсидии №14.577.21.0266 от 26.09.2017 г. с Министерством образования и науки Российской Федерации (далее – Минобрнауки России) по теме: «Разработка прототипов передовых технологических решений роботизированного интеллектуального производства электронной компонентной базы и энергоэффективных световых устройств» (далее – Соглашение) получены следующие результаты интеллектуальной деятельности (РИД):

а) патенты на изобретения:

1. патент РФ №2720046 (дата регистрации в Государственном реестре изобретений 23.04.2020) на изобретение «Светодиодная гетероструктура с квантовыми ямами комбинированного профиля»;

2. патент РФ №2723967 (дата регистрации в Государственном реестре изобретений 18.06.2020) на изобретение «Светодиодный источник излучения»;

б) патенты на полезные модели:

3. патент РФ №183304 (дата регистрации в Государственном реестре полезных моделей 17.09.2018) на полезную модель «Светодиодная лента для лампы»;

4. патент РФ №185874 (дата регистрации в Государственном реестре полезных моделей 21.12.2018) на полезную модель «Светодиодная лампа»;

5. патент РФ №193054 (дата регистрации в Государственном реестре полезных моделей 11.10.2019) на полезную модель «Светодиодная лента для лампы»;

6. патент РФ №192891 (дата регистрации в Государственном реестре полезных моделей 04.10.2019) на полезную модель «Светодиодный облучатель»;

7. патент РФ №195810 (дата регистрации в Государственном реестре полезных моделей 05.02.2020) на полезную модель «Светоизлучающий диод»;

8. патент РФ №185192 (дата регистрации в Государственном реестре полезных моделей 26.11.2018) на полезную модель «Корректор коэффициента мощности»;

в) свидетельство на программу для ЭВМ:

9. свидетельство о государственной регистрации № 2018662370 (дата регистрации в Реестре программ для ЭВМ 05.10.2018 года) «Программа автоматизации решения задач кинематики робототехнических систем производства светодиодных ламп».

2. В соответствии с пунктом 5 Договора 25/639 о дальнейшем использовании результатов прикладных научных исследований (проекта), заключенного 26.09.2017 г. между Исполнителем Соглашения (Лицензиаром по настоящему Договору) и Индустриальным партнером по Соглашению (Лицензиатом по настоящему Договору) во исполнение требований конкурсной документации Мероприятия 1.3 федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы», шифр: 2017-14-579-0057, организатором которого является Минобрнауки России,

Стороны заключили настоящий договор (далее – Договор) о нижеследующем:

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **2 834 209**⁽¹³⁾ **C1**
(51) МПК
F21V 33/00 (2006.01)
H05B 45/20 (2020.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
F21V 33/00 (2025.01); *H05B 45/20* (2025.01)

(21)(22) Заявка: 2024111936, 02.05.2024
(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
02.05.2024
Дата регистрации:
04.02.2025
Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 02.05.2024
(45) Опубликовано: 04.02.2025 Бюл. № 4
Адрес для переписки:
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ТУСУР,
Аркатова Ольга Евгеньевна

(72) Автор(ы):
Афонин Кирилл Нильевич (RU),
Ермолаев Александр Валерьевич (RU),
Солдаткин Василий Сергеевич (RU),
Туев Василий Иванович (RU),
Хомяков Артем Юрьевич (RU),
Шнайдер Екатерина Васильевна (RU),
Андреева Мария Владимировна (RU)
(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования "Томский государственный
университет систем управления и
радиоэлектроники" (RU)
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2526539 C2, 27.08.2014. RU 159034
U1, 27.01.2016. RU 201078 U1, 26.11.2020. DE
20317449 U1, 06.05.2004. DE 202008003928 U1,
03.07.2008. DE 10107972 A1, 12.07.2001. DE
29923252 U1, 05.10.2000.

(54) СВЕТИЛЬНИК КОМБИНИРОВАННЫЙ

(57) Реферат:
Изобретение относится к светотехнике, а именно к комбинированным светодиодным светильникам, и предназначено для освещения и обогрева рабочих мест в условиях отсутствия естественного освещения с функцией изменения коррелированной цветовой температуры для обеспечения циркадных ритмов человека. Заявлен светильник комбинированный, содержащий по меньшей мере один ряд модулей, образованный функциональными модулями, расположенными один за другим в ряд и включающими в себя по меньшей мере один обогревательный модуль, содержащий по меньшей мере один излучатель тепла, по меньшей мере один первый осветительный модуль, содержащий по меньшей мере один первый светоизлучающий осветительный элемент, при этом каждый ряд

модулей имеет центральное средство подвода питания и управления для изменения значения электрической энергии, подаваемой на подключенные к нему функциональные модули. По меньшей мере один ряд модулей дополнительно содержит второй осветительный модуль, содержащий по меньшей мере один второй светоизлучающий осветительный элемент, причем коррелированная цветовая температура светильника имеет значение в интервале от цветовой температуры первого осветительного модуля до цветовой температуры другого осветительного модуля. Технический результат - создание светильника комбинированного, обеспечивающего освещение рабочего места, изменение коррелированной цветовой температуры для обеспечения циркадных ритмов

RU 2 834 209 C 1

RU 2 834 209 C 1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) RU (11)

193 054⁽¹³⁾ U1

(51) МПК

F21S 4/20 (2016.01)

F21V 9/00 (2015.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

F21S 4/20 (2019.08); F21V 9/00 (2019.08)

(21)(22) Заявка: 2019119283, 19.06.2019

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
19.06.2019Дата регистрации:
11.10.2019

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 19.06.2019

(45) Опубликовано: 11.10.2019 Бюл. № 29

Адрес для переписки:

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ТУСУР,
патентно-информационный отдел

(72) Автор(ы):

Андреева Мария Владимировна (RU),
Афонин Кирилл Нильевич (RU),
Вилисов Анатолий Александрович (RU),
Ганская Елизавета Сергеевна (RU),
Солдаткин Василий Сергеевич (RU),
Туев Василий Иванович (RU),
Тепляков Константин Владимирович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Томский государственный
университет систем управления и
радиоэлектроники" (ТУСУР) (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 183304 U1, 17.09.2018. RU 172287
U1, 20.02.2019. CN 106468405 A, 01.03.2017. CN
105546488 A, 04.05.2016. US 20170130906 A1,
11.05.2017.

(54) СВЕТОДИОДНАЯ ЛЕНТА ДЛЯ ЛАМПЫ

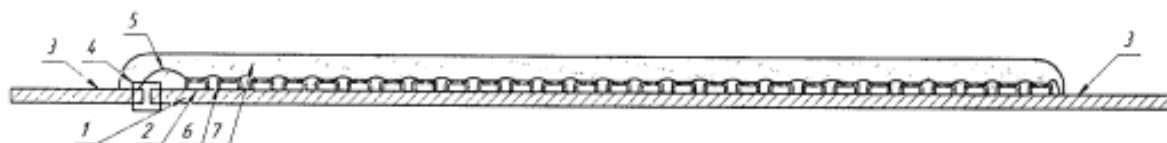
(57) Реферат:

Полезная модель относится к светотехнике, в частности к конструкции светодиодной ленты для лампы, заменяющей лампу накаливания в осветительных устройствах бытового и производственного назначения.

Светодиодная лента для лампы, содержащая протяженную подложку с металлическими наконечниками на краях, на которой размещены излучающие кристаллы синего цвета свечения, электрически соединенные проволокой согласно и последовательно вместе с наконечниками,

отличающаяся тем, что на кристаллы нанесена люминофорная композиция, поверх которой размещен слой компаунда с диффузантом, концентрация которого составляет от 3% до 10%.

Установлено, что пространственная неравномерность распределения коррелированной цветовой температуры в предлагаемой конструкции в четыре раза меньше, чем у прототипа при одинаковых значениях светового потока. 4 ил.



Фиг. 1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** (11) **2 828 620**⁽¹³⁾ **C1**
(51) МПК
F21V 14/08 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
F21V 14/08 (2024.08)

(21)(22) Заявка: 2024109014, 04.04.2024
(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
04.04.2024
Дата регистрации:
14.10.2024
Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 04.04.2024
(45) Опубликовано: 14.10.2024 Бюл. № 29
Адрес для переписки:
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ФГБОУ ВО
ТГУСУР

(72) Автор(ы):
Андреева Мария Владимировна (RU),
Солдаткин Василий Сергеевич (RU),
Туев Василий Иванович (RU),
Хомяков Артем Юрьевич (RU),
Золотухина Екатерина Андреевна (RU),
Афонин Кирилл Нильевич (RU),
Ермолаев Александр Валерьевич (RU),
Незнамова Елена Григорьевна (RU),
Терещенко Наталья Николаевна (RU)
(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Томский государственный
университет систем управления и
радиоэлектроники" (RU)
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 219968 U1, 16.08.2023. KR
1020130044615 A, 03.05.2013. RU 2702342 C1,
08.10.2019. RU 2568105 C2, 10.11.2015. RU 108213
U1, 10.09.2011. CN 103672484 A, 26.03.2014. WO
2012158436 A1, 22.11.2012.

(54) ОСВЕТИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО

(57) Реферат:
Изобретение относится к осветительной
технике, а именно к осветительным устройствам,
предназначенным для освещения рассады и
растений для применения, в частности, в
домашних условиях, в условиях «мини-ферм» и
«ферм на подоконнике», в составе аквапонных
систем и фитостен. Осветительное устройство
содержит колбу, в которой размещен держатель
со штенгелем и стойкой сердечника, на которой
закреплена объемная излучающая свет
конструкция из светодиодных нитей, цоколь и
устройство питания, электрически соединенное

с цоколем и светодиодными нитями. На части
внешней стороны колбы установлено подвижное
плёночное покрытие, содержащее люминофор,
при этом белый свет распространяется от
светодиодных нитей через незанятую покрытием
часть колбы. Технический результат - расширение
функциональности применения осветительного
устройства как для выращивания растений с их
произвольным пространственным расположением
относительно устройства, так и для освещения.
2 ил.

RU 2 828 620 C 1

RU 2 828 620 C 1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** (11) **219 968**⁽¹³⁾ **U1**
(51) МПК
F21V 33/00 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
F21V 33/00 (2023.05)

(21)(22) Заявка: 2023109005, 11.04.2023
(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
11.04.2023
Дата регистрации:
16.08.2023
Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 11.04.2023
(45) Опубликовано: 16.08.2023 Бюл. № 23
Адрес для переписки:
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ФГБОУ ВО
(Томский государственный университет систем
управления и радиозлектроники)

(72) Автор(ы):
Андреева Мария Владимировна (RU),
Солдаткин Василий Сергеевич (RU),
Туев Василий Иванович (RU),
Хомяков Артем Юрьевич (RU)
(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Томский государственный
университет систем управления и
радиозлектроники" (RU)
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: JP 2012059589 A, 22.03.2012. US
2014160763 A1, 12.06.2014. CN 108730790 A,
02.11.2018. RU 2585251 C2, 27.05.2016.

(54) СВЕТОДИОДНАЯ ЛАМПА
(57) Реферат:

Полезная модель относится к осветительной
технике, а именно к световым приборам для
выращивания рассады и растений. Светодиодная
лампа, содержащая колбу, в которой размещен
держатель со штенгелем и стойкой сердечника,
на которой закреплена объемная излучающая
свет конструкция из светодиодных нитей, цоколь
и устройство питания, электрически соединенное

с цоколем и светодиодными нитями, вершина
колбы заполнена оптически прозрачным
материалом, причем в оптически прозрачный
материал в вершине колбы добавлен красный
люминофор. Техническим результатом является
обеспечение как досветки растений в красной
области оптического спектра, так и
искусственного освещения. 3 ил.

RU 219968 U1

RU 219968 U1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **2 853 466** ⁽¹³⁾ **C1**
(51) МПК
H10H 20/01 (2025.01)
H10H 20/851 (2025.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
H10H 20/01 (2025.08); H10H 20/851 (2025.08)

(21)(22) Заявка: 2025118452, 03.07.2025
(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
03.07.2025
Дата регистрации:
23.12.2025
Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 03.07.2025
(45) Опубликовано: 23.12.2025 Бюл. № 36
Адрес для переписки:
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ФГАОУ ВО
"Томский государственный университет систем
управления и радиоэлектроники", Аркатова
Ольга Евгеньевна

(72) Автор(ы):
Андреева Мария Владимировна (RU),
Афонин Кирилл Нильевич (RU),
Ермолаев Александр Валерьевич (RU),
Солдаткин Василий Сергеевич (RU),
Туев Василий Иванович (RU)
(73) Патентообладатель(и):
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования "Томский государственный
университет систем управления и
радиоэлектроники" (RU)
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2451365 C1, 20.05.2012. RU
2499328 C1, 20.11.2013. RU 2481671 C2,
10.05.2013. RU 2550753 C2, 10.05.2015. RU
2569312 C2, 20.11.2015. EP 2074668 A1,
01.07.2009. US 10825949 B2, 03.11.2020.

(54) СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩЕГО ДИОДА

(57) Реферат:
Изобретение относится к способам
изготовления полупроводниковых приборов, в
частности к способам изготовления приборов,
специально предназначенных для светового
излучения. Способ изготовления
светоизлучающего диода, включающий монтаж
кристалла на клей в углубление корпуса,
соединение проволокой контактов кристалла и
корпуса, приготовление жидкой люминофорной
композиции, содержащей связующее и частицы
люминофора, и ее нанесение в углубление корпуса
с последующей сушкой - полимеризацией
компаунда, причем после нанесения

люминофорной композиции осуществляется
выдерживание корпуса светоизлучающего диода
вогнутой частью вниз в течение времени,
необходимого для осаждения частиц
люминофора, а отверждение люминофорной
композиции осуществляется также в положении
корпуса светоизлучающего диода вогнутой
частью вниз. Технический результат изобретения
заключается в увеличении расстояния между
частицами люминофора и светоизлучающим
кристаллом в объеме люминофорной композиции
в вогнутой части корпуса. 2 ил.

RU 2 853 466 C 1

RU 2 853 466 C 1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) RU (11)

195 810⁽¹³⁾ U1(51) МПК
F21V 14/00 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
H01L 33/00 (2019.08)

(21)(22) Заявка: 2019130932, 27.09.2019

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
27.09.2019Дата регистрации:
05.02.2020

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 27.09.2019

(45) Опубликовано: 05.02.2020 Бюл. № 4

Адрес для переписки:
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ТУСУР,
патентно-информационный отдел

(72) Автор(ы):

Андреева Мария Владимировна (RU),
Вилисов Анатолий Александрович (RU),
Ганская Елизавета Сергеевна (RU),
Солдаткин Василий Сергеевич (RU),
Туев Василий Иванович (RU),
Тепляков Константин Владимирович (RU),
Юлаева Юлия Витальевна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Томский государственный
университет систем управления и
радиоэлектроники" (ТУСУР) (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 86795 U1, 10.09.2009. RU 2134000
C1, 27.07.1999. US 6069440 A, 30.05.2000. WO
9812757A1, 26.03.1998. US 3819974 A, 25.06.1974.
US 5847507 A, 08.12.1998. JPH 0799345 A,
11.04.1995. US 4298820 A, 03.11.1981.

(54) СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЙ ДИОД

(57) Реферат:

Полезная модель относится к светотехнике, в частности к светоизлучающим диодам, и может найти применение в осветительных устройствах бытового и производственного назначения.

Светоизлучающий диод содержит плату, выполненную в виде многослойной структуры, которая содержит теплоотводящую основу с размещенными на ней последовательно слоями диэлектрического материала и металлических слоев, на которых выполнена заданная топология печатной платы, по крайней мере один светоизлучающий кристалл, защищенный

светопрозрачной герметизирующей средой, содержащей по крайней мере один тип люминофора. Поверх герметизирующего слоя нанесен дополнительный слой оптически прозрачного компаунда с диффузантом.

Экспериментально установлено, что в предложенной конструкции светодиода улучшается пространственная равномерность распределения коррелированной цветовой температуры за счет перемешивания излучения в компаунде с диффузантом. 2 ил.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

Перечень средств измерений и испытательного оборудования

Наименование, тип и марка	Кол-во	ГОСТ, ТУ или обозначение	Основные характеристики
Источник-измеритель	1	Keithley 2410	Диапазон измерений: Ток: 10 пА...10 А. Напряжение: 1 мкВ...1100 В. Мощность: 20 Вт...1000 Вт. Базовая погрешность измерения — 0,012% при 5½-разрядном разрешении. Точность источника напряжения: 0,02% от шкалы + 600 нВ (для диапазона 200 мВ), 0,02% от шкалы + 2,4 мВ (для 20 В), 0,02% от шкалы + 100 мВ (для 1000 В). Точность источника тока: 0,035% от шкалы + 600 пА (для 1 мкА), 0,035% от шкалы + 300 пА (для 10 мкА), 0,031% от шкалы + 100 пА (для 1 А).
Фотометрический шар	1	ТКА-КК1	Диапазон измерения светового потока, лм: 1 – 2000. Основная относительная погрешность измерения светового потока, %, не более: 10,0.
Гониофотометр	1	ГФ	Измерительная фотоголовка. Интегральная токовая чувствительность, нА/лк не менее 20; основная относительная погрешность не более ±6%; нелинейность чувствительности в диапазоне измерений, не более ±1%; погрешность коррекции $S_{0TH}(\lambda)$ ГФ относительно $V(\lambda)$ 1 класс; время непрерывной работы, час., не менее 8. Контрольно-измерительный блок с линейным приводом и угловыми

			датчиками лампы. Разрешающая способность датчика вертикальной платформы 14 двоичных разрядов, т.е. не хуже 1,5 угловых минуты. Абсолютная точность не хуже 2,5 минут. Разрешающая способность датчика кгла поворот вокруг горизонтальной оси 15 угловых минут.
Спектроколориметр	1	ТКА-ВД	Диапазоны измерения освещенности, лк 10 – 20000, яркости, кд/м² 10 – 20000, цветовой температуры, К 1600 – 16000, координат цветности $x = 0,004-0,734$; $y = 0,005-0,834$; $u' = 0,007-0,623$; $v' = 0,005-0,595$. Спектральный диапазон: 380-760 нм. Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерений яркости и освещенности не более $\pm 10\%$. Предел допустимого значения основной относительной погрешности измерения коррелированной цветовой температуры не более $\pm 5\%$.