

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЦВЕТОВЫХ ПАРАМЕТРОВ В ШАГАХ МАКАДАМА

М.В. Андреева<sup>1</sup>

В.С. Солдаткин<sup>1</sup>

В.И. Туев<sup>1</sup>

С.Н. Кичук<sup>2</sup>

mariya\_andreeva\_97@bk.ru

soldatkinvs@main.tusur.ru

tvi\_retem@main.tusur.ru

skichuk@ncfu.ru

<sup>1</sup> ТУСУР, Томск, Российская Федерация

<sup>2</sup> СКФУ, Ставрополь, Российская Федерация

---

### Аннотация

Представлена методика оценки равномерности пространственного распределения координат цветности светоизлучающих диодов, отличающаяся применением математического аппарата эллипсов МакАдама и позволяющая давать численную оценку пространственного распределения этих параметров. Методика включает в себя следующие этапы: 1) изготовление люминофорной композиции; 2) нанесение люминофорной композиции, изготовление макетов светодиодов; 3) измерение светового потока, световой отдачи и индекса цветопередачи; 4) проведение регрессионного анализа полученных результатов и отбор образцов; 5) измерение в пространстве координат цветности отобранных образцов; 6) получение аппроксимирующего выражения и нахождение погрешностей аппроксимации; 7) расчет отклонения цвета в шагах МакАдама. Разработанная методика апробирована на светодиодах с тремя образцами люминофоров. Пространственные отклонения координат цветности в шагах эллипсов МакАдама составили 4 ед., что соответствует границе визуального различия в цвете и предполагает дальнейшее проведение работ по увеличению пространственной однородности цвета. Установлено, что для светодиодов на базе кристаллов GaN/InGaN в корпусе SMD 5030 аппроксимация полиномом четвертой степени зависимости координат цветности от угла излучения позволяет обеспечить погрешность не более 4,5 %. Методика может быть полезна разработчикам и производителям светодиодов

### Ключевые слова

*Светодиодный излучающий диод, люминофор, люминофорная композиция, световой поток, световая отдача, координаты цветности, индекс цветопередачи, коррелированная цветовая температура*

Поступила 16.06.2023

Принята 01.09.2023

© Автор(ы), 2024

**Введение.** Существует два распространенных способа получения белого цвета свечения в светодиодах. Первый — объединение в одном корпусе светодиода чипов трех основных цветов (красного, зеленого и синего), смешение которых дает белый цвет. Кроме того, изменением интенсивности основных цветов можно получить любой цветовой оттенок. Второй способ — использование люминофора для конвертирования части синего или ультрафиолетового излучения в желто-оранжевый цвет. Среди этих технологий первая сопряжена с высокими производственными затратами и трудностями в стабильном смешивании цветов. Второй способ может обеспечить не только высокую эффективность преобразования, но и простоту в изготовлении и, таким образом, является одним из наиболее распространенных способов получения белого света.

Одним из важных параметров белого светодиода как источника света является индекс цветопередачи [1]. Цветопередача — понятие, характеризующее влияние спектрального состава источника света на зрительное восприятие цветных объектов, сознательно или бессознательно сравниваемое с восприятием тех же объектов, освещенных стандартным источником света. Цветопередача источника света оценивается общим индексом цветопередачи  $R_a$ . По качеству цветопередачи источники света подразделяются на высокого ( $R_a \geq 85$ ), среднего ( $85 \geq R_a \geq 70$ ) и низкого ( $R_a \geq 70$ )<sup>1</sup> качества.

Источники света играют важную роль при определении цвета предметов и материалов, поэтому их подробно изучили и разработали специальную систему классификации, в основу которой положено понятие цветовой температуры. Цветовая температура (спектрофотометрическая или калориметрическая) — температура, при которой абсолютно черное тело излучает свет такого же спектрального состава, как и рассматриваемый. В редких случаях спектральное распределение излучения и цветность реального тела точно совпадают со спектральным распределением и цветностью идеально черного тела при данной цветовой температуре, поэтому при характеристике излучения реально существующих тел используют понятие коррелированной цветовой температуры. Оно соответствует цветовой температуре, полученной определением на равноконтрастном цветовом графике точки на линии черного тела, ближайшей к точке, которая представляет собой цветность рассматриваемого источника света. Как правило, спектральный состав излучения и физическая

---

<sup>1</sup> Юшин А. М. Современные светодиоды: справочник. М., ИП РадиоСофт, 2013.

температура оказываются различными, что связано с отличием физических свойств реального тела от идеального черного [2].

Белые светодиоды чаще всего изготавливают на основе синего кристалла InGaN и желтого люминофора [3, 4]. В настоящее время для получения источников белого света на основе систем светодиодный чип–люминофор используются силикатные, нитридные и алюминатные люминофоры, легированные редкоземельными металлами (YAG:Eu, CaMoO<sub>4</sub>:Eu, Y<sub>3</sub>(Al,Si)<sub>5</sub>(O,N)<sub>12</sub>:Ce, Sr<sub>2</sub>Si<sub>5-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>x</sub>N<sub>8-x</sub>:Eu и др. [5]). Цвет свечения таких люминофоров — зеленый, желтый, оранжевый и красный. Наиболее распространены алюминатные люминофоры на основе иттрий-алюминиевых гранатов (ИАГ), легированных трехвалентным церием, и силикатов щелочноземельных металлов, легированных европием. Активно развиваются люминофоры на основе оксинитридных соединений. Люминофоры на основе ИАГ обладают квантовым выходом более 90 % в отличие от силикатных и нитридных, у которых квантовый выход составляет 84...87 % [6].

Большинство производителей в качестве желтых люминофоров применяют модифицированный ИАГ, легированный церием [7]. Спектр люминесценции этого люминофора характеризуется максимумом длины волны 530...560 нм. Длинноволновая часть спектра имеет большую протяженность, чем коротковолновая. Модифицирование люминофора добавками гадолиния и галлия позволяет сдвигать максимум спектра в холодную область (галлий) или в теплую (гадолиний).

В настоящее время световая отдача на уровне 190...210 лм/Вт характерна для большинства серийно выпускаемых светодиодных излучающих элементов, состоящих из кристалла синего цвета свечения и люминофорной композиции [8, 9]. Принцип работы люминофоров основан на эффекте Стокса, суть которого заключается в поглощении люминофором коротковолнового и фотолюминесценции длинноволнового [10]. Известны люминофоры различных типов и цветов фотолюминесценции<sup>2</sup> [11]. Существуют и разные методы их нанесения [12, 13].

Подбор люминофоров в зависимости от эффективности, размера частиц, материалов, спектров фотолюминесценции и методов приготовления люминофорных композиций является актуальной задачей для повышения световой отдачи и индекса цветопередачи промышленных светодиодов. Однако исследований на тему оценки пространственного распределения проведено недостаточно.

---

<sup>2</sup> Intematix Corporation. URL: <https://www.intematix.com> (дата обращения: 30.03.2023).

*Цель работы* — разработка методики оценки пространственного распределения цветовых параметров в шагах МакАдама для трех образцов люминофоров 1, 2 и 3. Люминофоры выполнены из модифицированного ИАГ. Образцы 1 и 2 — покупные люминофоры, образец 3 — экспериментальный образец (получен в СКФУ).

Необходимо выполнить следующие задачи:

- 1) изготовить макетные образцы светодиодных излучающих элементов;
- 2) провести измерения характеристик светодиодных излучающих элементов: интенсивность, световая отдача, световой поток и индекс цветопередачи;
- 3) провести измерение пространственного распределения характеристик светодиодов: координаты цветности;
- 4) провести регрессионный анализ и получить аппроксимирующее выражение для координат цветности;
- 5) рассчитать отклонения цвета в шагах МакАдама.

**Результаты.** Для проведения эксперимента изготовлены макеты светодиодных излучающих элементов. Для этого использованы образцы люминофоров 1, 2 и 3. Люминофорная композиция получена смешиванием желтого и красного люминофоров с компаундом. Концентрация желтого люминофора составила 12 %, красного — 1,5 %.

Для измерения интенсивности излучения и координат цветности использованы спектроколориметр ТКА-ВД<sup>3</sup>, фотометрический шар и источник питания Keithley 2410<sup>4</sup>. Для изготовления макетов светодиодного излучающего элемента использованы светодиоды синего цвета свечения (рис. 1).

Изготовлены девять образцов светодиодного излучающего элемента (по три образца на каждый тип люминофора). Интенсивность светодиодов измерена с использованием спектроколориметра.



**Рис. 1.** Светодиод синего цвета свечения

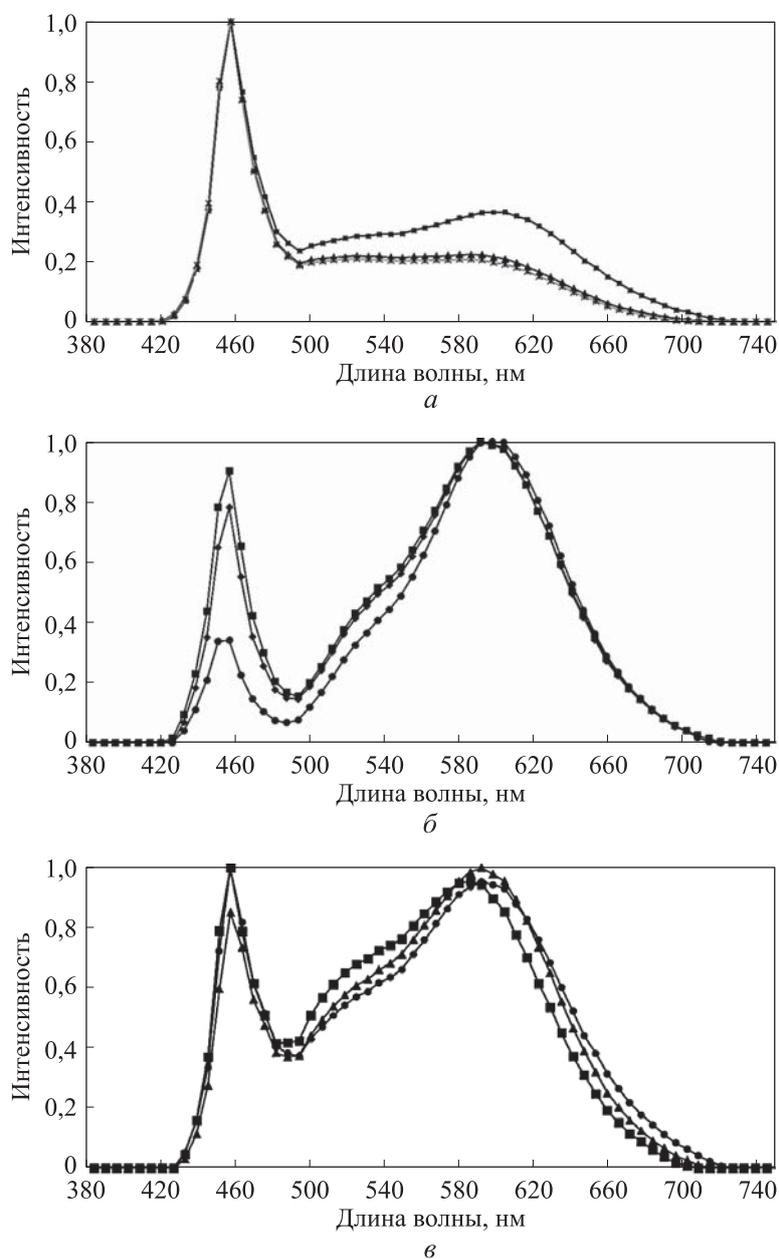
<sup>3</sup> Спектроколориметр ТКА-ВД.

URL: <https://www.tkaspb.ru/shop/kolorimetriya/spektrokolorimetr-tka-vd-2> (дата обращения: 22.02.2023).

<sup>4</sup> Источник-измеритель Keithley 2410.

URL: <https://radar1.ru/catalog/istochniki-izmeriteli/2410> (дата обращения: 01.03.2023).

Зависимости интенсивности светодиодов на основе образцов люминофоров 1, 2 и 3 от длины волны показаны на рис. 2.

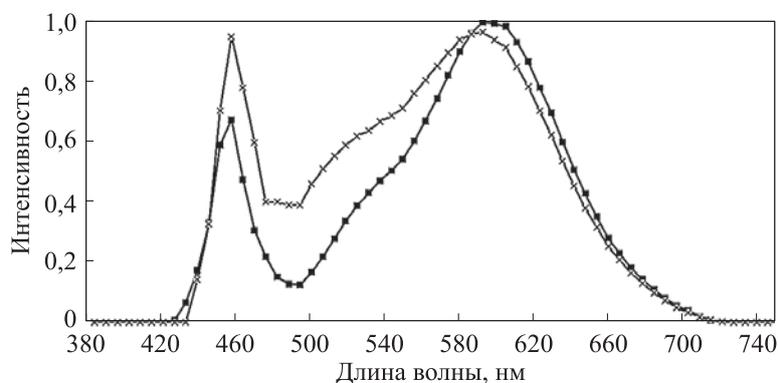


**Рис. 2.** Зависимости интенсивности светодиодов на основе образцов люминофоров 1 (а), 2 (б) и 3 (в) от длины волны:  
 образец 1: ▲ — 1(1); ■ — 1(2); \* — 1(3); образец 2: ■ — 2(1); ◆ — 2(2); ● — 2(3);  
 образец 3: ▲ — 3(1); ■ — 3(2); ● — 3(3)

Для определения грубых ошибок в выборке применим критерий трех сигм: отклонение значения нормально распределенной случайной величины  $X$  от ее математического ожидания  $\mu(X)$  не превосходит утроенного среднеквадратического отклонения (СКО)  $\sigma$  с вероятностью 0,9973 [14]. Другими словами, с вероятностью 0,9973 значение нормально распределенной случайной величины  $X$  находится в интервале  $[\mu(X) - 3\sigma \dots \mu(X) + 3\sigma]$ . Как правило, на практике с достаточной точностью не известны параметры распределения и используются их выборочные оценки — среднее значение  $x_{\text{ср}}$  и выборочное СКО  $s$ .

Для того чтобы определить, содержат ли зависимости на рис. 2 значения интенсивности с грубыми ошибками, необходимо рассчитать средние значения интенсивности по трем образцам для максимального значения интенсивности светодиода в желто-зеленой зоне. Расчеты показали, что грубых ошибок нет.

Далее необходимо усреднить графики для возможности проведения сравнения всех типов люминофоров между собой. Зависимость интенсивности люминофоров от длины волны приведена на рис. 3. Образец люминофора 1 показал наихудшие результаты, поэтому принято решение убрать его из дальнейших экспериментов.



**Рис. 3.** Зависимость интенсивности светодиодов на основе образцов люминофоров 2 (■) и 3 (×)

Измерены такие параметры, как световой поток, световая отдача и индекс цветопередачи. Полученные данные для макетных образцов приведены в таблице.

На основе полученных данных можно сделать вывод, что наилучшие показатели по большому числу характеристик у образца люминофора 3. Соответственно, дальнейшие расчеты будут проводиться для этого люминофора.

Значения параметров светодиодов ( $I = 80$  мА)

Образец люминофора	$U$ , В	$P$ , Вт	$\Phi$ , лм	Световая отдача, лм/Вт	$T_{\text{ц}}$ , К	$CRI$
2(1)	2,75	0,22	31,5	143,18	3279	78
2(2)	2,85	0,228	27,34	119,91	3094	76
2(3)	2,96	0,237	27,1	114,35	2591	71
3(1)	2,72	0,217	26,74	123,23	3867	81
3(2)	2,75	0,22	31,96	145,27	4478	79
3(3)	2,73	0,218	31,36	143,85	3913	84

Ввиду необходимости измерения параметров светодиодного излучающего элемента в пространстве спектроколориметр, а затем и светодиодный элемент крепят к гониофотометру. Измерения проводились на трех образцах в диапазоне значений угла  $-40 \dots 40^\circ$ .

Измерения координат цветности выполнялись в горизонтальной плоскости. В других плоскостях результаты измерений недостоверны. Результаты измерений представлены на рис. 4. Штриховыми линиями показан доверительный интервал.

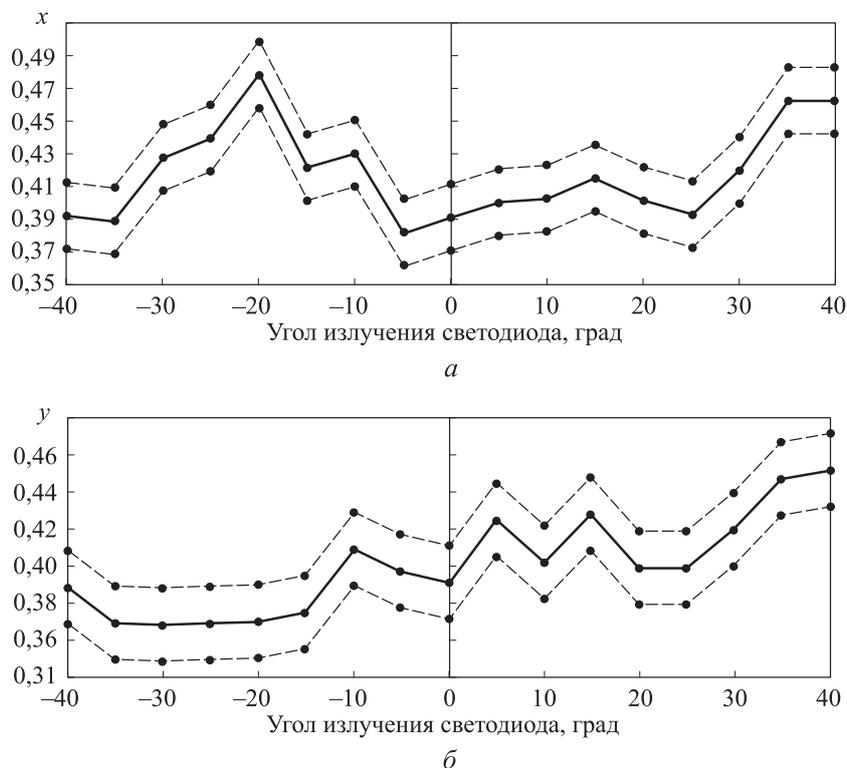


Рис. 4. Зависимости координат цветности  $x$  (а) и  $y$  (б) от угла излучения светодиода

Для того чтобы получить аналитическое выражение, которое аппроксимирует координаты цветности, следует использовать полиномиальное приближение [15]:

$$x(\alpha) = \beta_0 + \beta_1\alpha + \beta_2\alpha^2 + \beta_3\alpha^3 + \beta_4\alpha^4 + \dots + \beta_n\alpha^n, \quad (1)$$

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 четных членов разложения:

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

Чтобы найти коэффициенты  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$  выражения (2) необходимо использовать задачу множественной линейной регрессии. Для этого представим результаты измерений и коэффициенты модели (2) в виде матрицы [15]:

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

где  $\mathbf{x}$  — вектор-столбец, который состоит из  $n$  измеренных значений координат цветности в диапазоне значений углов  $-40^\circ (\alpha_1) \dots 40^\circ (\alpha_n)$ ;  $\mathbf{A}$  — матрица, состоящая из независимых переменных;  $\mathbf{B}$  — вектор-столбец, который включает в себя коэффициенты из выражения (2);  $\mathbf{e}$  — вектор-столбец отклонений предсказываемых выражением (2) значений координат цветности от измеренных значений  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

Выражение для  $\mathbf{e}$  в виде матрицы [15]:  $\mathbf{e} = \mathbf{x} - \mathbf{AB}$ , с учетом метода наименьших квадратов:

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

Условие (1) будет выполняться, если вектор-столбец  $\mathbf{B}$  примет вид [15]:

$$\mathbf{B} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{x}. \quad (3)$$

Графики координат цветности состоят из 17 точек ( $n = 17$ ), шаг по углу  $\alpha$  составляет  $5^\circ$ . Решение уравнения (3) с использованием полученных значений углов и координат цветности (см. рис. 4) дает коэффициенты:

для координаты  $x$

$$\beta_0 = 4,09 \cdot 10^{-1}; \beta_1 = 9,388 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-2}; \beta_2 = 1,135 \cdot 10^{-9} \text{ град}^{-4};$$

для координаты  $y$

$$\beta_0 = 3,95 \cdot 10^{-1}; \beta_1 = 3,768 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-2}; \beta_2 = 8,66 \cdot 10^{-9} \text{ град}^{-4}.$$

Соответственно, получим аппроксимирующие выражения для координат  $x$  и  $y$  [15]:

$$x_{norm}(\alpha) = 4,09 \cdot 10^{-1} + 9,388 \cdot 10^{-6} \alpha^2 + 1,135 \cdot 10^{-9} \alpha^4; \quad (4)$$

$$y_{norm}(\alpha) = 3,95 \cdot 10^{-1} + 3,768 \cdot 10^{-6} \alpha^2 + 8,66 \cdot 10^{-9} \alpha^4. \quad (5)$$

Для оценки качества аппроксимации рассчитаем средние погрешности аппроксимации по формулам

$$\eta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - \hat{x}_i}{x_i} \right| \cdot 100 \%; \quad (6)$$

$$\eta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \cdot 100 \%, \quad (7)$$

где  $n$  — число точек графика, в которых измерялись координаты цветности ( $n = 17$ , шаг по углу  $\alpha$  равен  $5^\circ$ );  $x_i$  — измеренные координаты цветности;  $\hat{x}_i$  — рассчитанные с помощью аппроксимирующего выражения координаты цветности [15].

Средняя погрешность аппроксимации по (6)  $\eta_{polynom} = 4,3 \%$ , по (7)  $\eta_{polynom} = 1,0 \%$ .

На основе полученных данных из (4) и (5) рассчитаем отклонение цвета в шагах МакаДама по формуле в соответствии с СТО.69159079-05–2020<sup>5</sup>:

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

где  $u', v'$  — координаты цветности рассматриваемого осветительного прибора в колориметрической системе МКО 1976;  $u'_c, v'_c$  — координаты цвет-

<sup>5</sup> СТО.69159079-05–2020. Приборы осветительные светодиодные. Требования к комфортной цветовой среде. М., АПСС, 2020. 76 с.

ности номинальной коррелированной цветовой температуры в колориметрической системе МКО 1976 [16].

Перевод координат цветности колориметрической системы МКО 1931 ( $x, y$ ) в систему МКО 1976 проводится по формулам [17]:

$$u'_c = \frac{4x}{-2x + 12y + 3};$$

$$v'_c = \frac{9y}{-2x + 12y + 3}.$$

Значения цветовых координат для коррелированной цветовой температуры, взятые из СТО.69159070-01–2018<sup>6</sup>, приведены в таблице [18]. Рассчитанное значение отклонения светодиода в шагах МакАдама составило 4 ед. Это свидетельствует о том, что отклонение цвета от нормы минимально [19, 20].

**Заключение.** Представлена методика оценки пространственного распределения цветовых параметров, которая отличается применением математического аппарата эллипсов МакАдама и позволяет оценивать пространственное распределение координат цветности. Описанная методика может быть полезна разработчикам и производителям светодиодов. Методика включает в себя изготовление люминофорной композиции, ее нанесение, изготовление макетов светодиодов, измерение интенсивности полученных образцов, а также характеристик (светового потока, световой отдачи и индекса цветопередачи), проведение регрессионного анализа результатов, измерение в пространстве координат цветности, получение аппроксимирующего выражения и определение погрешностей аппроксимации, расчет отклонения цвета в шагах МакАдама.

Разработанная методика расчета оценки равномерности пространственного распределения координат цветности светодиодов позволила установить, что наибольшей световой отдачей из трех образцов люминофоров обладает образец 3. Значение его световой отдачи 143,85 лм/Вт при коррелированной цветовой температуре 3 913 К и индексе цветопередачи 86. По усредненным значениям отклонения в шагах МакАдама для образцов светодиода отклонение составило 4 ед., т. е. отклонение цвета от нормы минимально.

---

<sup>6</sup> СТО.69159079-01–2018. Приборы осветительные светодиодные. Требования к техническим и эксплуатационным параметрам. М., АПСС, 2018.

Установлено, что для светодиодов на базе кристаллов GaN/InGaN в корпусе SMD 5030 аппроксимация полиномом четвертой степени зависимости координат цветности от угла излучения позволяет обеспечить погрешность не более 4,5 %.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность СКФУ за предоставление образца 3 люминофора.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Fairchild M.D. Color appearance models. Wiley, 2005.
- [2] Домасев М.В., Гнатюк С.П. Цвет. Управление цветом, цветовые расчеты и измерения. СПб., Питер, 2009.
- [3] Берг А., Дин П. Светодиоды. М., Мир, 1979.
- [4] Ключников С.В. Светодиоды в освещении. М., МИЭЭ, 2014.
- [5] Троцюк Л.Л., Тон Е.С., Цвирко В.И. и др. Фотолюминесцентные свойства люминофора на основе нанокристаллов перовскитов CsPbBr<sub>3</sub> при работе совместно с фиолетовыми светодиодами. *Журнал прикладной спектроскопии*, 2022, т. 89, № 5, с. 662–667. DOI: <https://doi.org/10.47612/0514-7506-2022-89-5-662-667>
- [6] Казанкин О.Н., Марковский Л.Я., Миронов И.А. Неорганические люминофоры. М., Химия, 1975.
- [7] Девярых Э.В., Дадонов В.Ф. Люминесцентные лампы. Люминофоры и люминофорные покрытия. Саранск, Изд-во Мордовского ун-та, 2007.
- [8] Narukawa Y., Ichikawa M., Sanga D., et al. White light emitting diodes with super-high luminous efficacy. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2010, vol. 43, no. 35, art. 354002. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/35/354002>
- [9] Tuev V.I., Soldatkin V.S., Andreeva M.V., et al. Investigation of phosphor compositions for led filament bulb. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2018, vol. 1115, no. 5, art. 052012. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1115/5/052012>
- [10] Stokes G.G. Über die Veränderung der Brechbarkeit des Lichts. *Ann. Phys. B*, 1852, vol. 163, iss. 11, pp. 480–490. DOI: <https://doi.org/10.1002/andp.18521631109>
- [11] Лисицын В.М., Сощин Н.П., Цзюй Я. и др. Характеристика фотолюминесценции люминофоров разной предыстории на основе иттрий-алюминиевого граната с Се, Gd. *Известия вузов. Физика*, 2017, т. 60, № 5, с. 106–112.
- [12] Шуберт Ф. Светодиоды. М., ФИЗМАТЛИТ, 2008.
- [13] Сощин Н.П. Светодиод + порошковый люминофор = новое качество света. *Светодиоды и лазеры*, 2002, № 1-2, с. 60–63.
- [14] Ивченко Г.И., Медведев Ю.И. Введение в математическую статистику. М., ЛКИ, 2009.

- [15] Юлаева Ю.В., Хомяков А.Ю., Туев В.И. Математическое моделирование пространственного распределения силы света нитевидного излучателя для светодиодных ламп. *Электронные средства и системы управления. Матер. докл. XVI Междунар. науч.-практ. конф. Ч. 1.* Томск, В-Спектр, 2020, с. 241–245.
- [16] MacAdam D.L. Visual sensitivities to color differences in daylight. *J. Opt. Soc. Am.*, 1942, vol. 32, iss. 5, pp. 247–274. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOSA.32.000247>
- [17] Shaw M., Fairchild M.D. Evaluating the 1931 CIE color-matching functions. *Color Res. Appl.*, 2002, vol. 27, iss. 5, pp. 316–329. DOI: <https://doi.org/10.1002/col.10077>
- [18] Галочкин В.Т. Эконометрика. М., Юрайт, 2017.
- [19] Brown W.R.J., MacAdam D.L. Visual sensitivities to combined chromaticity and luminance differences. *J. Opt. Soc. Am.*, 1949, vol. 39, iss. 10, pp. 808–834. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOSA.39.000808>
- [20] Wyszecki G., Fielder G.H. New color-matching ellipses. *J. Opt. Soc. Am.*, 1971, vol. 61, iss. 9, pp. 1135–1152. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOSA.61.001135>

**Андреева Мария Владимировна** — ассистент кафедры радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга ТУСУР (Российская Федерация, 634050, Томск, пр-т Ленина, д. 40).

**Солдаткин Василий Сергеевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга ТУСУР (Российская Федерация, 634050, Томск, пр-т Ленина, д. 40).

**Туев Василий Иванович** — д-р техн. наук, заведующий кафедрой радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга ТУСУР (Российская Федерация, 634050, Томск, пр-т Ленина, д. 40).

**Кичук Станислав Николаевич** — ведущий инженер лаборатории керамики и теххимии Научно-лабораторного комплекса «Чистые зоны» СКФУ (Российская Федерация, 355017, Ставрополь, ул. Кулакова, д. 2).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

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

EDN: AUMIYI

## DEVELOPMENT OF A METHOD TO ASSESS THE COLOR PARAMETERS SPATIAL DISTRIBUTION IN THE MACADAM STEPS

M.V. Andreeva<sup>1</sup>

V.S. Soldatkin<sup>1</sup>

V.I. Tuev<sup>1</sup>

S.N. Kichuk<sup>2</sup>

mariya\_andreeva\_97@bk.ru

soldatkinvs@main.tusur.ru

tvi\_retem@main.tusur.ru

skichuk@ncfu.ru

<sup>1</sup> Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,  
Tomsk, Russian Federation

<sup>2</sup> North Caucasian Federal University, Stavropol, Russian Federation

---

### Abstract

The paper presents a method to assess uniformity of the chromaticity coordinates spatial distribution in the light-emitting diodes. The method differs by introducing mathematical apparatus of the MacAdam ellipses and makes it possible to numerically assess spatial distribution of these parameters. It includes the following phases: 1) manufacture of the luminiferous composition; 2) luminiferous composition application and production of the LED models; 3) measuring luminous flux, luminous efficiency and color rendering index; 4) regression analysis of the results obtained and samples selection; 5) measuring the selected samples chromaticity in the coordinate space; 6) obtaining the approximating expression and finding the approximation errors; 7) color deviation computation in the MacAdam steps. The developed method was tested on LEDs with three luminiferous samples. Chromaticity coordinates spatial deviations in the MacAdam ellipses steps amounted to 4 units, which corresponds to the visual discrimination boundary in color and suggests further research to increase the color spatial uniformity. It was established that for the LEDs based on the GaN/InGaN crystals in the SMD 5030 housing, approximation by a fourth-degree polynomial of the chromaticity coordinates dependence on the emission angle allowed an error of no more than 4.5 %. The method could be useful to developers and manufacturers of the LEDs

### Keywords

*LED emitting diode, luminophor, luminiferous composition, luminous flux, luminous efficiency, chromaticity coordinates, color rendering index, correlated color temperature*

Received 16.06.2023

Accepted 01.09.2023

© Author(s), 2024

---

### REFERENCES

[1] Fairchild M.D. Color appearance models. Wiley, 2005.

- [2] Domasev M.V., Gnatyuk S.P. Tsvet. Upravlenie tsvetom, tsvetovye raschety i izmereniya [Color. Color management, color calculations and measurements]. St. Petersburg, Piter Publ., 2009.
- [3] Bergh A.A., Dean P.J. Light-emitting diodes. Oxford, Clarendon Press, 1976.
- [4] Klyushnikov S.V. Svetodiody v osveshchenii [LEDs in lighting]. Moscow, MIEE Publ., 2014.
- [5] Trotsiuk L.L., Ton E.S., Tsvirko V.I., et al. Photoluminescent properties of phosphor based on perovskite CsPbBr<sub>3</sub> nanocrystals combined with violet leds. *J. Appl. Spectrosc.*, 2022, vol. 89, no. 5, pp. 869–873. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10812-022-01440-3>
- [6] Kazankin O.N., Markovskiy L.Ya., Mironov I.A. Neorganicheskie lyuminofory [Inorganic phosphors]. Moscow, Khimiya Publ., 1975.
- [7] Devyatykh E.V., Dadonov V.F. Lyuminescentnye lampy. Lyuminofory i lyuminofornyye pokrytiya [Fluorescent lamps. Phosphors and phosphor coatings]. Saransk, MRSU Publ., 2007.
- [8] Narukawa Y., Ichikawa M., Sanga D., et al. White light emitting diodes with super-high luminous efficacy. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2010, vol. 43, no. 35, art. 354002. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/35/354002>
- [9] Tuev V.I., Soldatkin V.S., Andreeva M.V., et al. Investigation of phosphor compositions for led filament bulb. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2018, vol. 1115, no. 5, art. 052012. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1115/5/052012>
- [10] Stokes G.G. Über die Veränderung der Brechbarkeit des Lichts. *Ann. Phys. B*, 1852, vol. 163, iss. 11, pp. 480–490. DOI: <https://doi.org/10.1002/andp.18521631109>
- [11] Lisitsyn V.M., Soshchin N.P., Yang yang Y., et al. Photoluminescence characteristics of Yag:Ce, Gd based phosphors with different prehistories. *Russ. Phys. J.*, 2017, vol. 60, no. 5, pp. 862–869. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11182-017-1150-3>
- [12] Schubert E.F. Light-emitting diodes. Cambridge Univ. Press, 2006.
- [13] Soshchin N.P. Light-emitting diode + powder phosphor = new quality of light. *Svetodiody i lazery*, 2002, no. 1-2, pp. 60–63 (in Russ.).
- [14] Ivchenko G.I., Medvedev Yu.I. Vvedenie v matematicheskuyu statistiku [Introduction to mathematical statistics]. Moscow, LKI Publ., 2009.
- [15] Yulaeva Yu.V., Khomyakov A.Yu., Tuev V.I. [Mathematical modeling of the spatial distribution of the luminous intensity of a filamentous emitter for LED lamps]. *Elektronnyye sredstva i sistemy upravleniya. Mater. dokl. XVI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Ch. 1* [Electronic Means and Control Systems. Proc. XVI Int. Sci.-Pract. Conf. P. 1]. Tomsk, V-Spektr Publ., 2020, pp. 241–245 (in Russ.).
- [16] MacAdam D.L. Visual sensitivities to color differences in daylight. *J. Opt. Soc. Am.*, 1942, vol. 32, iss. 5, pp. 247–274. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOSA.32.000247>
- [17] Shaw M., Fairchild M.D. Evaluating the 1931 CIE color-matching functions. *Color Res. Appl.*, 2002, vol. 27, iss. 5, pp. 316–329. DOI: <https://doi.org/10.1002/col.10077>
- [18] Galochkin V.T. Ekonometrika [Econometrics]. Moscow, Yurayt Publ., 2017.

[19] Brown W.R.J., MacAdam D.L. Visual sensitivities to combined chromaticity and luminance differences. *J. Opt. Soc. Am.*, 1949, vol. 39, iss. 10, pp. 808–834. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOSA.39.000808>

[20] Wyszecki G., Fielder G.H. New color-matching ellipses. *J. Opt. Soc. Am.*, 1971, vol. 61, iss. 9, pp. 1135–1152. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOSA.61.001135>

**Andreeva M.V.** — Assist. Lecturer, Department of Radioelectronic Technologies and Environmental Monitoring, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (Lenina prospekt 40, Tomsk, 634050 Russian Federation).

**Soldatkin V.S.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Radioelectronic Technologies and Environmental Monitoring, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (Lenina prospekt 40, Tomsk, 634050 Russian Federation).

**Tuev V.I.** — Dr. Sc. (Eng.), Head of the Department of Radioelectronic Technologies and Environmental Monitoring, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (Lenina prospekt 40, Tomsk, 634050 Russian Federation).

**Kichuk S.N.** — Leading Engineer, Laboratory of Ceramics and Technochemistry of the Scientific and Laboratory Complex “Clean Zones”, North Caucasian Federal University (Kulakova ul. 2, Stavropol, 355017 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Andreeva M.V., Soldatkin V.S., Tuev V.I., et al. Development of a method to assess the color parameters spatial distribution in the MacAdam steps. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2024, no. 1 (146), pp. 4–18 (in Russ.). EDN: AUMIYI