



КАЗАНСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

КГЭУ



ТИНЧУРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

XIV Международная
молодежная научная
конференция

ТОМ I 23-26 апреля 2019 г.
Казань

Часть 1

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Министерство образования и науки Республики Татарстан
Академия наук Республики Татарстан
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Казанский государственный энергетический университет»

**XIV МЕЖДУНАРОДНАЯ МОЛОДЕЖНАЯ НАУЧНАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ «ТИНЧУРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ»**

23–26 апреля 2019 г.

Материалы конференции

В трех томах

Том 1

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Часть 1

*Под общей редакцией ректора КГЭУ
Э. Ю. Абдуллазянова*

Казань
2019

ОСОБЕННОСТИ ЦВЕТОПЕРЕДАЧИ СВЕТОДИОДОВ БЕЛОГО ЦВЕТА

А.Р. Зарипова
ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань
alfira1996@mail.ru
Науч. рук. канд. техн. наук А.Н. Борисов

Аннотация. Рассмотрено понятие индекса цветопередачи, история его появления, физический смысл. Представлены особенности цветопередачи различных видов источников света. Показано, что светодиодные источники света не всегда можно оценивать по этому параметру.

Ключевые слова: абсолютно черное тело, источник света, эталонный источник света, отражающая поверхность, цветопередача, спектр.

Важной характеристикой источников белого света является их способность передавать реальные цвета физических объектов. Таковую особенность называют индексом цветопередачи – CRI.

При освещении объекта светом от источника с высоким индексом цветопередачи цвета, воспринимаемые глазом человека, кажутся более насыщенными и живыми по сравнению со светом от источника с низким индексом цветопередачи. Это важно при использовании световых устройств в целях освещения специализированных помещений, где важно правильно отобразить цвета объектов (например, в музеях, домах и офисах). Светильники с пониженным индексом цветопередачи можно применять для подсветки улиц и парковок. При использовании источников света в качестве индикаторных ламп и других указательных устройств этот параметр совсем теряет свое значение.

Для определения индекса цветопередачи тестируемого источника излучения к передаче цветов производится:

1. Сравнение его с эталонным источником света. По рекомендации МКО (CIE, 1995) для проведения расчетов эталонный источник выбирается исходя из следующих соображений.

Если координаты цветности тестового источника лежат на кривой Планка, то эталонный источник должен быть абсолютно черным телом, имеющим ту же цветовую температуру, что и тестируемый излучатель. Если координаты цветности тестового источника не принадлежат кривой Планка, то эталонный источник должен быть абсолютно черным телом, имеющим ту же коррелированную цветовую температуру, что и тестируемый излучатель. В качестве эталонного источника можно использовать один из стандартных источников МКО (например, D_{65}).

Идеальный случай – тестируемый и эталонный источники света имеют одинаковые координаты цветности и равные световые потоки. Согласно требованиям МКО, принято считать, что эталонный источник света обладает идеальными параметрами цветопередачи, т.е. его индекс цветопередачи $CRI = 100$. При этом имеется в виду, что естественный дневной свет близок по параметрам к излучению абсолютно черного тела и поэтому по праву может быть отнесен к стандартным эталонным источникам света. Индексы цветопередачи реальных излучателей, отличных от эталонных источников света, всегда ниже 100. Понятно, что получаемые значения индексов цветопередачи сильно зависят от выбранного эталонного источника излучения. Поэтому при сравнении индекса цветопередачи разных источников света надо очень внимательно подходить к выбору эталонного излучателя.

Поскольку спектры излучения ламп накаливания и абсолютно черного тела близки, такие лампы обладают максимально возможными индексами цветопередачи. Поэтому с точки зрения цветопередачи лампы накаливания являются лучшими среди всех источников искусственного освещения. В этом и заключается причина того, что кварцевые галогенные лампы накаливания широко используются там, где необходима отличная передача цвета – в музеях, художественные галереи и магазины одежды. К недостатку кварцевых галогенных ламп относится их высокое энергопотребление.

2. Используют эталонные отражающие поверхности. Таковыми могут быть реальные объекты, например: фрукты, цветы, дерево, мебель и одежда.

Однако с целью обеспечения международной стандартизации при определении коэффициентов цветопередачи реальных излучателей применяется специальный набор из 14 цветных поверхностей. Этот набор из 14 цветов был выбран из гораздо большего набора цветов, первоначально предложенного Альбертом Г. Манселлом. Она получила название цветовой системы Манселла и позволяет идентифицировать очень широкий диапазон цветов.

Термин появился приблизительно в 1960-1970-х годах, когда была разработана система, математически сравнивающая, насколько источник света изменяет расположение в спектральной шкале восьми определенных пастельных цветов по сравнению с теми же цветами, освещенными эталонным источником цвета той же цветовой температуры, согласно определению Международной комиссии по освещению (*CIE*).

Методы расчета индекса цветопередачи (*CRI*) подробно обсуждаются в работах [1–4]. МКО предложила следующую формулу для вычисления полного (суммарного) значения этого индекса:

$$CRI_{general} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 CRI_i$$

где *CRI* – частные индексы цветопередачи для восьми эталонных поверхностей, которые определяются по формуле

$$CRI = 100 - 4,6\Delta E_i^*$$

где E_i^* – разность цветов эталонной поверхности при ее последовательном освещении эталонным и тестовым источниками излучения.

Значения суммарных индексов цветопередачи наиболее распространенных источников света цветности

Источник света	Индекс цветопередачи	
Солнечный свет	100	А
Кварцевые галогенные лампы с вольфрамовой нитью накаливания	100	Б
Лампы с вольфрамовой нитью накаливания	100	Б
Флуоресцентные лампы	60–95	Б
Трехцветные светодиоды белого свечения	60–95	Б, В
СД белого свечения на основе люминофоров	55–85	Б, В
Двухцветные светодиоды белого свечения	10–60	Б, В
Ртутные лампы, покрытые люминофором	50	Б
Ртутные лампы	33	Б
Натриевые лампы высокого и низкого давления	10 и 22	Б
Зеленый монохроматический свет	–50	В

Примечание. Эталонные источники: А – солнечный свет; Б – свет лампы накаливания с коррелированной цветовой температурой; В – источник *D65*.

Иногда для более детального изучения способности излучателей воспроизводить цвета применяют шесть дополнительных цветов. Они в основном используются для специальных нужд, но не участвуют при расчетах индекса цветопередачи.

По определению, если не существует разницы в том, как выглядят цвета предметов, источнику света присваивается индекс цветопередачи 100. Таким образом, при малых различиях *CRI* будет ближе к 100, в то время как более серьезные различия приведут к получению меньшей величины индекса цветопередачи.

В качестве эталонного источника света принято использовать абсолютное черное тело, так как $CRI = 100$.

Разность цветов ΔE^* , часто называемая цветовым контрастом, играет ключевую роль в вычислении индекса цветопередачи, поэтому в последующих двух разделах будут подробно обсуждаться способы ее определения применительно к тестируемым источникам излучения, лежащим на кривой Планка и вне ее.

Эталонные отражающие поверхности, о которых упоминалось выше, определяются через их спектральную отражательную способность. Суммарный индекс цветопередачи вычисляется на основе измерений при использовании всех восьми эталонных поверхностей ($r = 1-8$).

Иногда для более детального изучения способности излучателей воспроизводить цвета помимо восьми эталонных образцов (с номерами 1–8) применяют шесть дополнительных эталонных отражающих поверхностей (с номерами 9–14). Эти дополнительные поверхности характеризуются следующими цветами: 9 – интенсивный красный, 10 – интенсивный желтый, 11 – интенсивный зеленый, 12 – фиолетово-синий, 13 – телесный цвет, 14 – цвет листьев на деревьях.

Из таблицы понятно, что наиболее высоким индексом цветопередачи являются приборы с телом накала, цветовые температуры которых находятся в диапазоне от 2000 до 5000 К. Эталонным источником света в этом случае является «излучатель черного тела», а с цветовыми температурами выше этого диапазона – дневной свет. Индекс цветопередачи и у ламп накаливания, и у неба северного полушария считается равным 100, притом ни один из них не является действительно безупречным.

С индексом цветопередачи светодиодов дело обстоит иначе. Во многих случаях RGB-светодиоды имеют индексы цветопередачи в районе 20, но при этом хорошо показывают передачу цветов [1]. Чаще это происходит от того, что они обычно склонны повышать воспринимаемую насыщенность большинства цветов без смещения цветопередачи оттенков. В 2010 году для более точной оценки качества передачи цвета была разработана методика Color Quality Scale (CQS). Однако методика CQS не стала полноценной заменой *CRI*, так как также не

учитывала тон и насыщенность цветов освещаемых предметов. Поэтому в августе 2015 года был разработан стандарт TM-30-15, который оценивает качество цвета не только по цветным шаблонам, но и встречающимся в повседневности предметам. Как кардинально улучшить цветопередачу светодиодов? Очевидно, что это будет поиск новых составов люминофоров. Известно, что дешевый широкополосный люминофор (галофосфат кальция и магния) дает свет с параметром CRI не выше 70 Ra [2]. Нанотехнологии позволяют повысить качество высокоэффективных белых светодиодов, поскольку использование квантовых коллоидных точек в качестве люминофорного покрытия позволило увеличить CRI до 90 Ra [3]. Применение светодиодов с дорогим трех- и пятиполосным люминофором сразу увеличивает его до 85...95 Ra. Но главным недостатком люминофорных светодиодов является низкая по сравнению с RGB светоотдача. Сфера применимости светодиодов будет расширяться одновременно с увеличением светоотдачи, улучшением качества света и снижением стоимости светодиодных источников света.

Пока же индекс цветопередачи можно считать одним из информационных параметров при оценке светодиодных изделий и систем на их основе. Он может быть использован для выбора конкретного светотехнического изделия без предварительных персональных оценок и тестирования изделия на предполагаемом месте эксплуатации. Освещение светодиодами можно сравнивать только с источниками света равной цветовой температуры.

Кроме того, некоторые светодиодные решения с CRI столь низкими, как 25, и излучают визуально приятный белый свет [4].

Тогда зачем же использовать CRI, если у этой величины так много недостатков? В настоящее время это единственная признанная на международном уровне система оценки цветопередачи, которая дает потребителям некоторые ориентиры. В этой области ведет работу Государственный институт стандартов и технологии (NIST) США, разрабатывающий Шкалу качества цвета для решения некоторых проблем существующей системы оценки цветопередачи CRI, и Российские метрологические институты, но пока еще эта шкала повсеместно не принята.

Источники

1. Шуберт Ф. Светодиоды / пер. с англ.; под ред. А. Э. Юновича. 2-е изд. М.: Физматлит, 2008. 496 с.

2. Duggal A.R. Organic electroluminescent devices for solid-state lighting in Organic Electro-luminescence / ed. by Z.H. Kafafi. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis, 2005. 514 p.

3. Kendall M. and Scholand M. Energy Savings Potential of Solid State Lighting in General Lighting Applications // U.S. Department of Energy, Washington, DC, Apr. 2001.

4. Long J. and Luke J. T. The New Munsell Student color Set. 2nd ring-bound ed. Fairchild Books and Visuals, New York, 2001.

УДК 535.24

ПРОСВЕТЛЯЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СВЕТООТДАЧИ СВЕТОДИОДОВ

Д.Н. Козина
ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань
d.kozina@list.ru

Науч. рук. канд. техн. наук А.Н. Борисов

Аннотация. Проведен анализ просветляющих покрытий. Разработаны покрытия, позволяющие повысить светоотдачу светодиодов, не изменяя их конструкции. Покрытия оптимизируются под любой прозрачный оптический материал. Вариация показателей преломления и толщин слоев позволяет получить эффект для любой области спектра.

Ключевые слова: тонкие пленки, интерференция, просветление, светодиоды, световая отдача, пропускание.

В настоящий момент задача исследований повышения светоотдачи источников света актуальна, поскольку ее решение может привести к экономии энергии, и материальных средств. Принципиально этот вопрос возможно решить для источника света любого типа, поскольку у любого светильника имеются элементы вторичной оптики. Но вопросы повышения светоотдачи светодиодных элементов стоят наиболее остро, потому как на сегодняшний день они являются наиболее безопасными и экономичными источниками света.

Целью работы является нахождение конкретного метода повышения светоотдачи светодиода на основе всестороннего изучения возможностей применения различных достижений в современных областях фотоники и нанотехнологии. Наиболее простым и приемлемым решением является применение просветляющих слоев, наносимых непосредственно на готовый светодиод, без изменения его конструкции и технических параметров.