УДК 628.938

СВЕТОДИОДНЫЙ ПРИБОР УЛУЧШЕННОЙ ЦВЕТОПЕРЕДАЧИ

Борискина А.А., Коваленко О.Ю., Пильщикова Ю.А.

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск, e-mail:crystall2000@mail.ru

В настоящее время все более широкое распространение получает светодиодное освещение, в связи с чем актуальна проблема показателей качества его цветопередачи. Целью исследования явилось получение цветности светодиодного осветительного прибора с индексом цветопередачи более 80 и координатами цветности высокой точности. С этой целью разработан экспериментальный образец на базе тепло-белых, холодно-белых, красных и желтых светодиодов, расположенных на плате равномерно в матричном порядке, с возможностью регулировки токовых режимов каждой группы цветности светодиодов. Выбор количества и цветностей светодиодов осуществлен посредством математического моделирования, в основу алгоритмов которого положены экспериментально полученные распределения светового потока светодиодов и зависимости светового потока от тока. Отклонение экспериментально полученных координат цветности от расчетных составляет 0,1% по x и 1,5% по y. Использование только белых светодиодов позволяет получать индекс цветопередачи 75, дополнительное включение красных и желтых светодиодов повышает индекс цветопередачи до 81, а полученная цветность располагается вблизи кривой излучения абсолютно черного тела. Возможна регулировка цветности в широком диапазоне цветовых температур при включении и отключении отдельных цветностей светодиодов и управлении токовыми режимами. Следовательно, данный осветительный прибор может применяться для освещения офисов и жилых помещений, а также для создания рабочего режима и комфортного отдыха.

Ключевые слова: светодиод, осветительный прибор, цветопередача, цветность, цветовая температура

LED LIGHTING DEVICE WITH IMPROVED COLOR REPRODUCTION

Boriskina A.A., Kovalenko O.Y., Pilschikova Y.A.

Ogarev Mordovia State University, Saransk, e-mail: crystall2000@mail.ru

Nowadays LED lighting has become more widespread, and therefore the problem of color reproduction quality is very actual. The aim of the research was to obtain the color of LED lighting device with a color rendering index of more than 80 and chromaticity coordinates of high accuracy. For this purpose, an experimental model based on the warm-white, cool-white, yellow and red LEDs on the board uniformly in the matrix order, with adjustable current mode of each color LEDs was developed. Selecting of the number and color of LEDs was carried through a mathematical model, based on the experimentally obtained algorithms of light distribution and LED light output depending on the current. The deviation of the chromaticity coordinates obtained experimentally of the calculated rate is 0,1% with respect to x and 1,5% in y. Only the using of the white LED produces 75 color rendering index, the additional inclusion of red and yellow LEDs improves the color rendering index of 81, and the resulting color is near the curve of blackbody radiation. One can adjust the color in a wide range of color temperatures for enabling and disabling individual locus LEDs and current-mode control. Therefore, this luminary can be used for offices and homes lighting, as well as to create a working regime and comfortable staying.

Keywords: LED, lighting, color, color temperature

Осветительные приборы на базе светодиодов активно внедряются в системы освещения, особенно для наружного освещения, освещения лестничных клеток подъездов. Менее активно происходит внедрение светодиодных светильников в системы освещения общественных и жилых помещений, в основном из-за недостаточно высокого качества освещения и высокой стоимости приборов со светодиодами. Проблема высокой стоимости постепенно решается с переходом к массовому производству, в связи с чем проблема повышения показателей качества цветопередачи становится еще более актуальной.

Теоретическое обоснование

Цветопередача характеризует влияние спектрального состава излучения источника на зрительное восприятие цветных объектов по сравнению с восприятием их при освещении опорным источником.

Показателями качества цветопередачи служат частные индексы цветопередачи и общий индекс цветопередачи R_a. Опорными источниками являются стандартные источники A, B, C, D.

Например, стандартный источник A моделирует искусственные источники освещения с цветовой температурой 2856 K, к которым относятся, например, лампы накаливания.

Цветовая температура – характеристика хода интенсивности излучения источника света, как функции длины волны в оптическом диапазоне. Согласно формуле Планка, цветовая температура определяется как температура абсолютно черного тела, при которой оно испускает излучение того же цветового тона, что и рассматриваемое излучение.

Осветительные приборы с индексом цветопередачи R_a 90–100 применяются в основном там, где важна точная оценка цвета, R_a 80–90 – там, где точная оценка не является приоритетной задачей, но хорошая цветопередача все же важна, $R_a < 80$ – там, где цветопередача не важна. Таким образом, $R_a \geq 80$ применим для жилых помещений; $R_a \geq 60$ – для общественных зданий; $R_a \geq 50$ – для производственных зданий.

В настоящее время с проблемой низких значений R_a производители светодиодов и модулей пытаются бороться, например, производитель OSRAM заявляет

у модулей PrevaLEDLEP-3000-930-HD-C индекс цветопередачи более 90.

Существуют проблемы в определении индекса цветопередачи для светодиодов, так как основными источниками света, качество которых призвана оценивать методика CRI, явились люминесцентные лампы, в том числе с трех- и пятилинейчатым спектром. Но для осветительных светодиодов, «белый» свет которых в самом худшем случае может состоять только из двух цветов – глубокого синего и желтого шкала уже не в полной мере удовлетворяет своему назначению.

Считается, что расчет индекса цветопередачи с погрешностью до 5 единиц допустим, однако это говорит о несовершенстве существующей системы определения индекса цветопередачи. В настоящее время есть предложения по пересмотру расчета индекса цветопередачи. Национальным институтом стандартов и технологий США (NIST) разработана методика оценки качества света, в которой попытались исправить все известные недостатки. Однако данная методика заведомо не может являться объективной при оценке качества цветопередачи, так как методика CQS в отличие от CRI штрафует снижение цветовой температуры ниже 3500 К. В результате этой поправки по шкале CQS общие индексы цветопередачи ламп накаливания уже не будут иметь столь высоких значений, практически недостижимых для светодиодных источников [5]. Спектр ламп накаливания с цветовой температурой около 2700 К близок к спектру излучения Солнца, с чем связано восприятие этого излучения человеком как комфортного. Шкала CQS необъективно оценивает качество цветопередачи в пользу светодиодов. По нашему мнению, введение этой шкалы преждевременно.

Проблема оценки качества освещения в настоящее время очень актуальна, однако в национальный стандарт РФ ГОСТ Р 54350-2011 «Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний», распространяющийся на осветительные приборы на базе светодиодов, не были включены требования к индексу цветопередачи.

В ГОСТ Р 54350-2011 устанавливаются рекомендуемые допускаемые отклонения коррелированной цветовой температуры с указанием границ отклонений значений координат цветности [2].

Для производителей существует острая проблема получения одинаковых значений цветовой температуры и координат цветности, близких к кривой излучения абсолютно черного тела, для осветительных приборов с одним и тем же типом светодиодов от одного и того же производителя.

Светодиоды, выпускаемые производителями имеют различные значения параметров, в ряде случаев значительно отличающихся от заявленных.

Отклонения температуры цветности и координат цветности от номинальных значений могут быть значительными, поэтому светодиоды поставляются на рынок отсортированными по подклассам или бинам. Заранее неизвестно, какими конкретно бинами будут обладать светодиоды. Светодиоды сортируются (бинируются) по двум параметрам: световой поток и координаты цветности, для чего производится измерение значений этих параметров для каждого светодиода. Данная операция очень трудоемка, при этом остается разброс в пределах одного бина, и цветность таких групп отсортированных светодиодов различна.

Результаты исследования и их обсуждение

Все светодиоды можно разделить на белые (тепло- и холодно-белые), применяемые при создании осветительных приборов, и цветные, используемые в системах декоративной подсветки, в светосигнальных приборах и др. Тепло-белый свет является наиболее предпочтительным для освещения жилых помещений. Партия тепло-белых светодиодов, приобретенных в розничной торговле, была исследована спектрорадиометром Specbos 1211 № 2011370 (ЗАО «НТЦ Экспертцентр» ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева»). Для тепло-белых светодиодов получены следующие результаты: $x = 0{,}4359$, $y = 0{,}4427$, $T_{цв} = 3336$ К, $R_a = 68$.

Оказалось, что данные светодиоды не обеспечивают приемлемой цветопередачи и не попадают на линию абсолютно черного тела. Ведущие производители заявляют более высокие параметры цветопередачи, но приобрести их в свободной продаже не всегда предоставляется возможным, а потому зачастую потребитель сталкивается со светодиодами с невысокими значениями индекса цветопередачи. Из опыта получения различных цветностей люминесцентных ламп известно, что для достижения высоких индексов цветопередачи были разработаны лампы с трехкомпонентными (трехслойными) люминофорами на основе солей редкоземельных металлов с $R_a > 80$, а затем с пятикомпонентными (пятислойными), R_a которых > 90. Также для получения желаемых значений R_a в одном светильнике использовали люминесцентные лампы теплой и холодной цветностей.

Недостатком трех- и пятикомпонентных люминофоров является невозможность различения цветов, попадающих за пределы узких полос излучения многокомпонентного люминофора, недостатком одновременного использования тепло- и холодно-белой цветности является недостаточно высокий R_a.

Задачей исследования явилось получение цветности, попадающей на кривую излучения абсолютно черного тела, с индексом цветопередачи более 80.

Решением задачи создания осветительного прибора на базе светодиодов улучшенной цветопередачи явилось комбинирование в одном осветительном приборе различных белых и цветных светодиодов. С этой целью был изготовлен опытный образец, включающий тепло-белые, холодно-белые, желтые и красные светодиоды. В приборе светодиоды каждого цвета размещены в матричном порядке равномерно на плате. При этом

предусмотрена возможность отдельного включения и отключения каждой группы цветности светодиодов, каждая из групп имеет свой регулятор тока. Создавая осветительные системы из светодиодов различной цветности, необходимо использовать светодиоды одного типа, направленность излучения которых одинакова [4].

Выбор количества светодиодов и цветности являлся расчетной задачей, которая решалась посредством математического моделирования [1].

В качестве исходных данных использовались спектральные распределения светового потока светодиодов и зависимости светового потока от тока, полученные путем измерения параметров светодиодов каждой группы цветностей с последующим усреднением результатов. Установка для определения значений светового потока представляла собой тубус с зачерненной внутренней поверхностью и установленным внутри матовым стеклом на расстоянии 3 см от светодиодов, что позволяет обеспечить равномерную освещенность площади селенного фотоэлемента ФЭС-25 и устранить погрешности, возникающие в результате девиации. Светодиоды устанавливались на подставке с электрическими вводами и позицией для их установки, которая фиксировала положение светодиодов. Предполагалось, что значения светового потока светодиодов пропорциональны значениям измеренной освещенности. Данная установка обеспечивает сопоставимость результатов измерений, так как использовался фотоэлемент, скорригированный под чувствительность человеческого глаза при высоком качестве коррекции (погрешность коррекции не выше 1,5 %).

Зависимость светового потока от тока была представлена в аналитическом виде полиномами 2-й степени. Был введен коэффициент, учитывающий соотношение светового потока от тока, протекающего через светодиоды каждой цветности.

С помощью спектроколориметра «ТКА-ВД»/2 было получено спектральное распределение светового потока в табличном виде для светодиодов каждой цветности для осуществления расчета координат цветности и последующего определения цветовой температуры.

Для исследования были выбраны тепло-белые и холодно-белые светодиоды следующих цветностей: 3336 К и 10000 К соответственно.

Проведенный расчет количества светодиодов для получения заданных значений координат цветности осветительного прибора показал, что более половины светодиодов должны быть белыми, при этом количество тепло-белых должно превышать количество холодно-белых более чем в 2 раза, остальные светодиоды – цветные [3].

Спектральное распределение мощности излучения смоделированной осветительной системы определялось путем суммирования распределений отдельных групп светодиодов, определяемых по формуле:

$$F_{\sum i}(\lambda)=\sum_{i=1}^{n} k_i n_i m_i(\lambda) F_i(\lambda),$$

где k_i – расчетные коэффициенты, определяющие соотношение световых потоков, полученных с помощью ФЭС, корригированного под чувствительность человеческого глаза; n_i – количество светодиодов i-й цветности, используемых в осветительной системе; $m_i(I)$ – коэффициент, равный отношению значения освещенности светодиодов i-й цветности при соответствующем токе к значению освещенности светодиодов этой же цветности при номинальном токе; $F_i(\lambda)$ – нормированная спектральная мощность излучения одного светодиода i-й цветности, о.е.

Расчет показал, что комбинирование тепло-белых и холодно-белых светодиодов с цветными в одном осветительном приборе позволяет регулировать цветность в широком диапазоне. Регулировка цветности осуществляется путем включения различных групп светодиодов каждой цветности, а более точная подстройка – с помощью управления токовыми режимами. Определение значений координат цветности, коррелированной цветовой температуры и индексов цветопередачи осуществлялось с помощью спектрорадиометра Specbos 1211.

При одновременном включении только тепло-белых и холодно-белых светодиодов в осветительном приборе была получена $T_{цв}$ = 4025 К. Индекс цветопередачи составил 75. Дополнительное включение красных и желтых светодиодов снижает цветовую температуру до 3265 К и повышает индекс цветопередачи до 81, координаты цветности x = 0,4185, y = 0,3969. Посредством математической модели получены координаты цветности x = 0,4191, y = 0,3908. На рис. 1 приведен спектр излучения, а на рис. 2 – диаграмма цветности осветительной системы, сформированной из комбинации холодно-белых, тепло-белых, красных и желтых светодиодов.

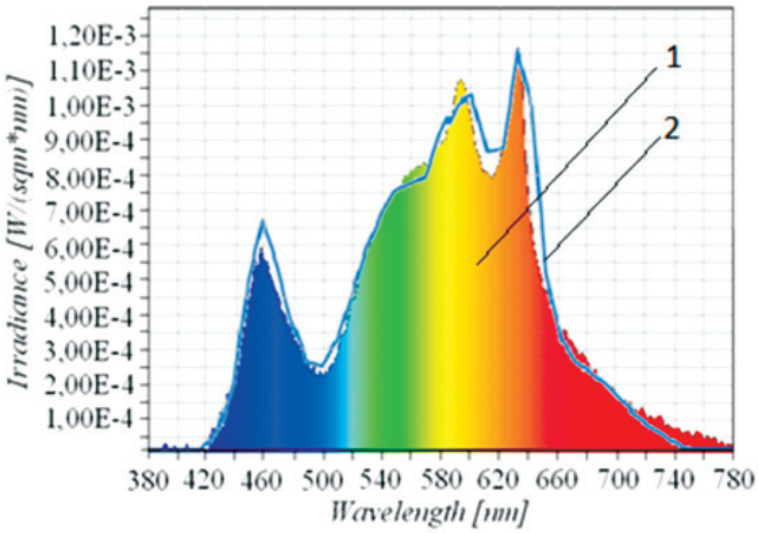

Рис. 1. Спектр излучения осветительной системы, сформированной из комбинации холодно-белых, тепло-белых, красных и желтых светодиодов:
1 – экспериментальный осветительный прибор; 2 – расчетный осветительный прибор

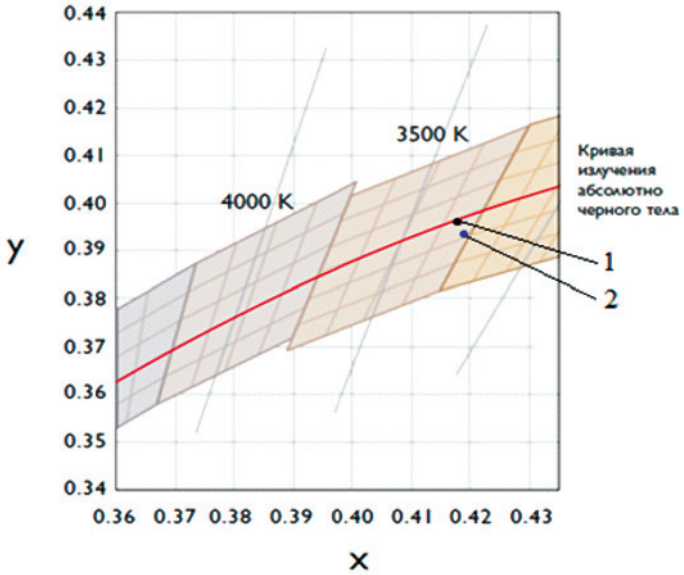

Рис. 2. Фрагмент диаграммы цветности системы, сформированной из холодно-белых, тепло-белых, красных и желтых светодиодов:
1 – экспериментальный осветительный прибор; 2 – расчетный осветительный прибор

Заключение

Разработанный осветительный прибор позволяет осуществлять регулировку цветности в широком диапазоне цветовых температур и получение промежуточных значений. Это позволяет подбирать цветность для различных областей применения и создания различных эффектов. При этом отклонение светового потока от номинального составляет ±8 %.

Предварительный расчет дает возможность определить количество светодиодов и токовые режимы для получения заданной цветности с погрешностью, не превышающей 1,5 %. При этом разброс в пределах допуска на цветность можно сократить минимум втрое. Математическая модель позволяет получить заданные значения цветовой температуры, используя светодиоды невысокого качества.

Таким образом, данный осветительный прибор может применяться при освещении там, где важна хорошая цветопередача, т.е. возможно его применение в офисных и жилых помещениях. Кроме того, возможна регулировка для создания рабочего режима и комфортного отдыха.

Список литературы

1. Борискина А.А., Костычев А.А. Светодиодные осветительные приборы с возможность регулировки цветности // Светотехника, электротехника и метрология: Сб. науч-метод. тр. / О.Е. Железникова (отв. ред.). – Саранск: СВМО, 2012. – С. 113–114.

2. ГОСТ Р 54350-2011 Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний;введ. в действ. 2012-01-07. – М.: Стандартинформ, 2011. – 37 с.

3. Коваленко О.Ю., Панфилов С.А., Медведева А.А. Автоматизация измерений и контроля характеристик светодиодов // Измерение, информатизация, моделирование: проблемы и перспективы технологий разработки и применения (тематический выпуск) /// Ползуновский вестник. – 2011. – № 3/1. – С. 207–209.

4. Патент РФ № 118719, 27.07.2012.

5. Шаракшанэ А. Шкалы оценки качества спектрального состава света – CRI и CQS // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – № 4. – С. 32–35.

References

1. Boriskina A.A. LED lights with adjustable Color / Light and light sources / Zheleznikova O.E. (Ed.). – Saransk CBMO, 2012. pp. 109–112.

2. GOST R 54350-2011 Lighting devices. Lighting requirements and test methods, enter. in action. 07/01/2012. Moscow: Standartinform. 2011, 37 p.

3. Kovalenko O.U., Panfilov S.A, Medvedeva A.A. Automated measurement and control characteristics of LEDs // measurement, information, modeling: problems and prospects of the development of technologies and applications (special issue) / PolzunovskyVestnic. 2011. no. 3/1. pp. 207–209.

4. Patent number 118,719, 27/07/2012.

5. Sharakshane A. Scales assess the quality of the spectral composition of light – CRI and CQS // semiconductor lighting. 2011. no. 4. pp. 32-35.

Рецензенты:

Микаева С.А., д.т.н., профессор кафедры ПР-4 «Электротехника и электроника» Московского государственного университета приборостроения и информатики, г. Москва;

Корочков Ю.А., д.т.н., заведующий лабораторией газоразрядных ламп высокого давления ГУП Республики Мордовия «НИИИС им. А.Н. Лодыгина», г. Саранск.

Работа поступила в редакцию 12.03.2013.