

Перевод: Мансур Бадгутдинов

Начало в № 4'2013

Теория цвета

и успешное применение светодиодов. Часть 4

Цветопередача, или характеристика того, как цвет выглядит при освещении искусственным источником света, очень важна для светодиодных систем освещения. В четвертой части настоящего цикла публикаций, посвященного теории цвета, будет рассмотрено влияние архитектуры светодиодов на освещаемые предметы.

Несмотря на то, что при разработке светодиодных систем освещения основное внимание уделяется возможностям энергосбережения и эффективности на компонентном и системном уровне, немаловажным остается вопрос качества освещения. В настоящей части цикла, посвященного теории цвета, будет рассмотрено решение проблемы разработки эффективных и высококачественных источников света, хотя эти характеристики, как будет показано далее, и противоречат друг другу.

В первой части установлено три основополагающих закона цветного зрения:

- Относительного отклика трех типов колбочек в сетчатке достаточно для объяснения явления цветного зрения.
- Принцип метамерии (являющийся прямым следствием первого закона).
- Цвет может быть описан несколькими наборами функций согласования цвета, которые являются линейным преобразованием друг друга.

Во второй части статьи с помощью этих законов было дано объяснение происхождения диаграммы цветности МКО, а также определение положения на ней цветовых координат смеси нескольких цветов. Кроме того, обсуждалось происхождение Планковского локуса — кривой в центре диаграммы, состоящей из координаты цветности определенного источника белого света, известного как абсолютно черное тело (АЧТ). В третьей

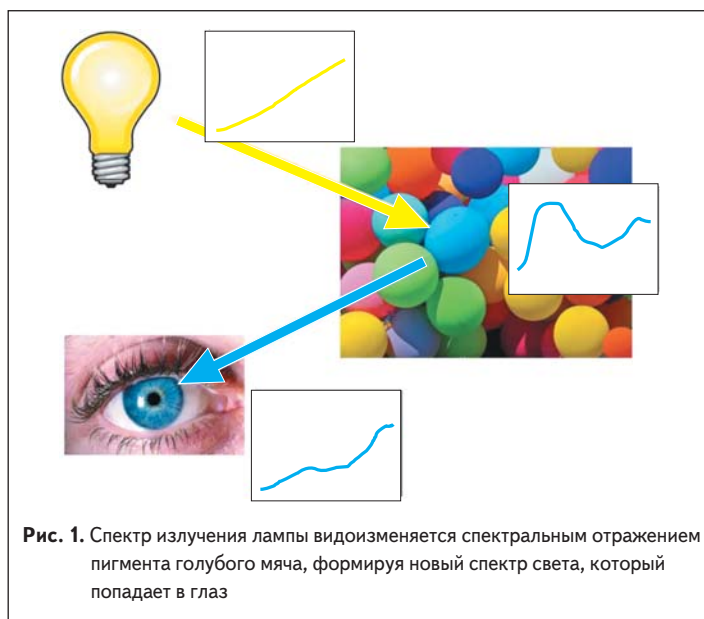


Рис. 1. Спектр излучения лампы видоизменяется спектральным отражением пигмента голубого мяча, формируя новый спектр света, который попадает в глаз

части статьи данные знания были использованы для иллюстрации способа проектирования осветительных устройств на основе светодиодов (СД), в которых происходит смешение света цветных и белых СД с различной коррелированной цветовой температурой (КЦТ). Такие способы позволяют получить результаты, недостижимые с применением одних только белых СД с одинаковой цветовой температурой.

В этой части будут рассмотрены свойства цветопередачи белых СД. Цветопередача указывает, насколько визуальное восприятие цвета различных предметов может изменяться при их освещении различными источниками света. Для нас вполне естественно, что цвета предметов каким-либо образом меняются при освещении источниками света с различными цветовыми температурами. Мы замечаем изменения цветов в природе в течение солнечного дня от полудня до заката. Возможно, кто-то даже выбирал цветную краску в магазине при естественном или люминесцентном освещении, а потом испытал разочарование, покрыв ею стены и увидев получившийся оттенок при освещении лампами накаливания. Эти примеры явлений цветопередачи находятся в пределах нашего житейского опыта, они предсказуемы и частично могут быть объяснены различиями в КЦТ источников света.

Менее очевидно, впрочем, возможное значительное изменение цвета освещаемого предмета при замене одного источника света другим, даже если оба обладают в точности одинаковыми КЦТ или одинаковыми координатами цветности. Для понимания того, каким образом это происходит, необходимо воспользоваться первыми двумя законами цветного зрения.

Первый принцип цветного зрения утверждает, что видимые нами цвета непосредственно связаны с относительным откликом трех типов колбочек на спектральный состав света, попадающего на сетчатку. Это означает, что два источника света с различными спектрами излучения могут, тем не менее, вызывать одинаковый относительный отклик трех типов колбочек и, следовательно, выглядеть одинаковыми по цвету. По этой же причине смешанное излучение от красного, зеленого и синего СД может иметь тот же цвет, что и лампа накаливания с цветовой температурой 3000 К, даже несмотря на то, что спектры лампы и смеси СД сильно различаются. До тех пор пока отклик колбочек на оба спектра идентичен, цвета обоих источников будут выглядеть одинаково. Это явление называется метамерией и представляет собой второй закон цветного зрения. Любые два и более спектра излучения, которые имеют одни и те же координаты цветности, являются метамерами друг друга.

Отраженный свет

Картина меняется, если наблюдатель видит отраженный от предмета свет при освещении этого предмета двумя или более метамерами. В этом случае спектральный состав света, излучаемого каждым источником, видоизменяется спектральными свойствами отражения предмета, от которого отражается свет, прежде чем попасть на сетчатку глаза. Синий предмет, например, отражает в синей области спектра вблизи длин волн 400–500 нм и поглощает средне- и длинноволновое излучение. Следовательно, спектр отраженного света является функцией как спектра источника, так и спектральных отражающих свойств освещенного предмета (рис. 1).

Такая сложная взаимосвязь означает, что цвет предмета может сильно измениться при последовательном освещении двумя метамерными

источниками света. Если спектры двух источников света различны, то спектры отраженного света также могут различаться, даже если источники имеют в точности одинаковые координаты цветности. Более того, спектры отраженного света, скорее всего, не будут метамерами и, соответственно, будут различаться по цвету.

Цветопередача особенно важна для освещения жилых помещений. Спектр обычного белого СД сильно отличается от спектра ламп для освещения жилого пространства, будь то лампа накаливания или люминесцентная лампа (рис. 2). Потребители могут разочароваться, обнаружив существенные изменения в цвете знакомых им предметов в своих домах или офисах, после того как они установят новые СД-лампы.

Ранее индустрия освещения уже сталкивалась с подобной проблемой. Это привело к разработке индекса цветопередачи (Color Rendering Index, CRI) — меры количественного описания свойств цветопередачи конкретного источника света в сравнении с лампой накаливания при цветовых температурах до 5000 К и с дневным светом при цветовых температурах более 5000 К. При точном совпадении (когда цвета выглядят или воспроизводятся одинаково при освещении интересующим источником света и дневным светом или лампой накаливания) CRI будет достигать величины 100. Причем необходимо понимать, что CRI не является идеальной мерой описания качества цветопередачи источников света, однако его практическое использование вполне оправданно.

CRI вычисляется из сравнения координат цветности набора стандартных поверхностей или цветовых образцов при их поочередном освещении тестируемым и эталонным источниками света. Такие стандартные образцы имеют определенные спектральные функции отражения, означающие процент отражения света на каждой длине волны для каждого определенного цветового образца. Определять координаты цветности образцов не имеет смысла без определения источника света, освещающего их, а точнее без определения спектра источника. Всего для расчета индексов цветопередачи используется 14 цветовых образцов. Восемь из них используется для получения величины общего индекса цветопередачи (раздел «Вычисление CRI»), остальные шесть — для расчета частных индексов, представляющих определенные цвета. Цветовые образцы были выбраны таким образом, чтобы представлять собой различные материалы (рис. 3).

Важность CRI в светодиодном освещении

Цветопередача важна в основном для внутреннего освещения и менее значима при наружном освещении. Натриевые лампы высокого давления (НЛВД) для уличного освещения, например, обладают очень низким CRI, достигая в некоторых случаях значений 20. Такая слабая цветопередача компенсируется исключительной светоотдачей, достигающей 150 лм/Вт. Цветопередача при таком применении обычно считается несущественной по сравнению с энергетической эффективностью. Некоторые типы НЛВД обладают немного более высоким CRI, достигаемым, однако, за счет более низкой световой эффективности.

Единственным применением для наружного освещения, в котором важен высокий CRI, является архитектурное освещение — при подсветке стен зданий или создании заливающего освещения, используемых при освещении фасадов и ландшафта. Низкий CRI в архитектурном освещении может значительно уменьшить эстетическое восприятие здания или ландшафта.

При внутреннем освещении CRI важен, в частности, в жилом секторе, а также при освещении предприятий торговли и общественного питания. Для офисного пространства CRI не имеет большого значения, поскольку в офисе учитывается обеспечение наилучшей освещенности для выполнения зрительных задач и в меньшей степени для эстетического восприятия.

СД-лампы и (в меньшей степени) светильники начинают широко внедряться на рынок жилого освещения. Для успешного развития данного направления стоимость СД-лампы и светильников должна непрерывно снижаться с сохранением высокого качества продукции. Более высокая стоимость СД-продуктов по сравнению с компактными люминесцентными лампами и лампами накаливания может в некоторой степени компенсироваться долгим сроком службы СД и продолжающимся увеличением их энергетической эффективности. Впрочем, качество СД-продуктов подразумевает не только надежность. Качество света, производимого

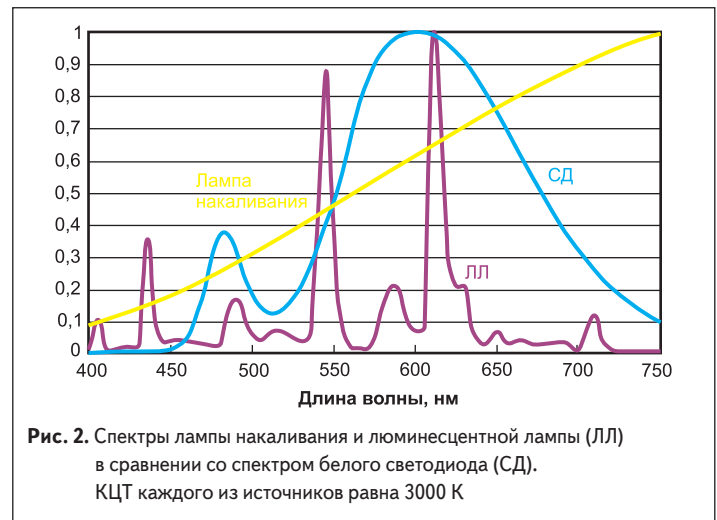


Рис. 2. Спектры лампы накаливания и люминесцентной лампы (ЛЛ) в сравнении со спектром белого светодиода (СД). КЦТ каждого из источников равна 3000 К

светодиодной лампой или светильником, также важно, особенно для бытовых потребителей, и под этим подразумеваются свойства цветопередачи самих СД, входящих в состав лампы или светильника. Поскольку на данный момент CRI является единственным признанным стандартом оценки качества цветопередачи, он становится важной продуктовой характеристикой наряду с надежностью и светоотдачей.

Достижение высокого CRI с помощью СД

Производители СД часто сталкиваются с противоречивыми целями, такими как достижение низкой стоимости и высокой производительности. Производство СД с высоким CRI и светоотдачей, особенно при низких цветовых температурах, является одной из таких проблем. Причина этого связана с принципами создания белого света с помощью СД.

В действительности белые СД — это синие СД, покрытые люминофором, преобразующим оптическое излучение. Люминофор поглощает часть синего света, излучаемого СД, и пропускает оставшуюся часть без поглощения. Часть поглощенного люминофором излучения возбуждает электроны в его молекулах, которые переходят на более высокие энергетические уровни. По мере перехода электронов обратно на низкоэнергетические уровни они излучают фотоны. По своей природе спектр излучения люминофора широкополосный, он простирается от 500 до 700 нм с максимумом излучения обычно вблизи 550 нм.

Если бы люминофор поглощал весь синий свет, то суммарный цвет свечения был бы желтым. Но поскольку часть излучения от синего СД не поглощается, то в сумме с желтым излучением люминофора создается белый свет. Если в смеси содержится больше синего света, чем белого, то ее цвет будет холодным белым, с высокой КЦТ. Если же смесь содержит больше желтого света от люминофора, чем синего от СД, то это будет теплый белый свет с низкой КЦТ.

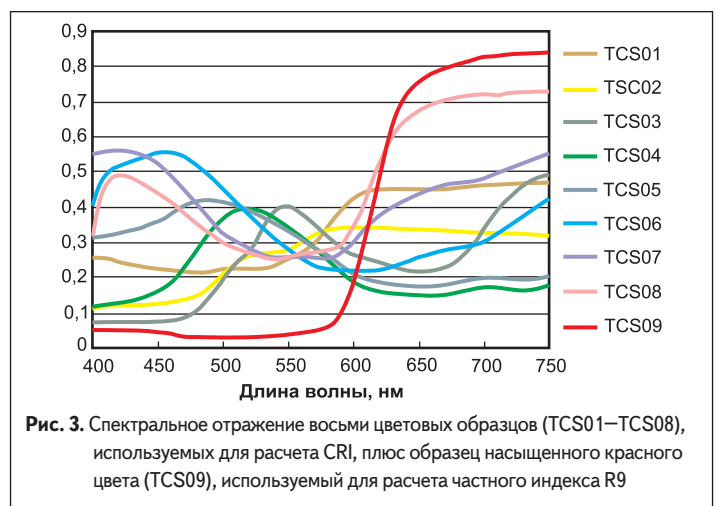


Рис. 3. Спектральное отражение восьми цветовых образцов (TCS01–TCS08), используемых для расчета CRI, плюс образец насыщенного красного цвета (TCS09), используемый для расчета частного индекса R9

Эффективность и светоотдача

Оптическая производительность такой СД-структуры довольно эффективна по двум причинам. Во-первых, синие светодиоды на основе материалов InGaN весьма эффективны в преобразовании потребляемой электрической мощности в оптическую мощность. Эффективность СД определяется отношением оптической мощности в ваттах излучения света, покидающего СД, к потребляемой электрической мощности (тоже в ваттах). Для типичного синего СД, созданного на основе материала InGaN, эта эффективность составляет около 30–35%. Несмотря на столь высокие значения эффективности, синие СД обладают очень низкой светоотдачей, поскольку глаз не очень чувствителен к синему излучению. В действительности именно чувствительность глаза привела к использованию в качестве основной меры измерения эффективности источника света термина светоотдача, измеряемой в люменах на ватт. Спектр излучения люминофора при этом хорошо согласуется с кривой спектральной чувствительности глаза $V(\lambda)$, а потому основной вклад в светоотдачу белого СД обусловлен желтым излучением люминофора и в гораздо меньшей степени синим излучением, проходящим сквозь слой люминофора (рис. 4).

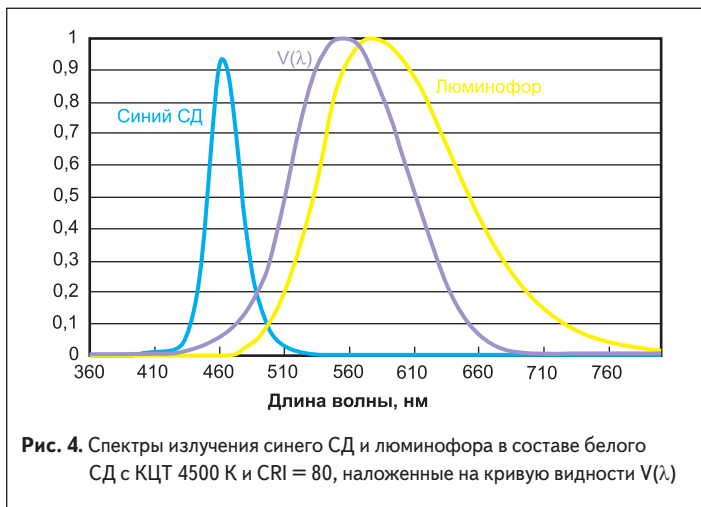


Рис. 4. Спектры излучения синего СД и люминофора в составе белого СД с КЦТ 4500 К и CRI = 80, наложенные на кривую видности $V(\lambda)$

В принципе, если не задаваться целью достижения высокой цветопередачи или координат цветности СД в области вблизи Планковской кривой, то можно создавать СД с очень высокой светоотдачей. Для этого нужно использовать люминофор, спектр излучения которого максимально соответствует кривой видности $V(\lambda)$; причем слой люминофора должен быть достаточно большим, чтобы синее излучение СД полностью поглощалось люминофором.

В то время как приближение спектра СД как можно ближе к кривой видности $V(\lambda)$ позволит получить очень эффективный и, следовательно, яркий свет, оно не позволит получить белый свет. Поэтому в спектре белого СД необходимо некоторое количество света в синей и красной области спектра, даже если свет на этих длинах волн дает малый вклад в яркость, воспринимаемую глазом. Для создания холодных белых СД это легко сделать простым увеличением количества синего излучения, проходящего сквозь люминофор.

Для создания теплых белых СД люминофор должен излучать достаточно энергии в красной области спектра. Для того чтобы создать СД с КЦТ 2700 К, выбирают люминофоры с широким спектром излучения, пик излучения которых приходится на диапазон 590–630 нм. К сожалению, эти люминофоры создают значительное количество света также и в области длин волн выше 650 нм, к которому глаз очень слабо чувствителен, давая, таким образом, малый вклад в светоотдачу СД. Вот почему СД с более низкой КЦТ тоже обладают более низкой светоотдачей по сравнению со СД с высокой КЦТ аналогичного качества.

Высокий CRI в светодиодах теплого белого цвета

Ситуация осложняется необходимостью получить СД с низкой КЦТ и высоким CRI — предпочтительное сочетание параметров для применения в жилом секторе. В этом случае требуется еще больше

длинноволнового света (600–700 нм) по отношению к средним и коротким длинам волн. Для достижения цели пик излучения люминофора должен быть еще больше сдвинут по направлению к красной области спектра, дополнительно уменьшая светоотдачу СД.

Производителям СД-светильников было предложено два решения этой проблемы. Одно из них — добавить красный СД к белому для повышения содержания красного света в спектре без необходимости идти на компромисс между светоотдачей белого СД и индексом цветопередачи. Примером такого подхода являются, в частности, СД Brilliant Mix производства Osram. Эта технология улучшает общую эффективность системы благодаря использованию зеленовато-белого СД с люминофором, спектр излучения которого хорошо согласован с кривой видности $V(\lambda)$, что приводит к достижению высокой светоотдачи (рис. 5).

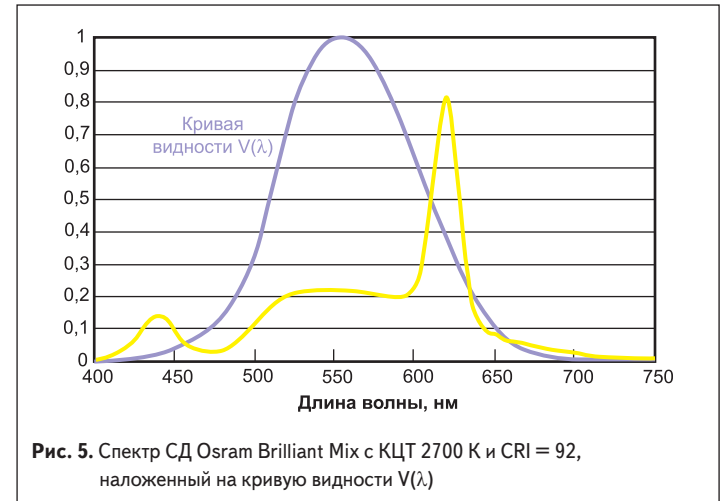


Рис. 5. Спектр СД Osram Brilliant Mix с КЦТ 2700 К и CRI = 92, наложенный на кривую видности $V(\lambda)$

Второй подход заключается в применении двух люминофоров. Основной люминофор сдвинут по направлению к синей области спектра, а второй люминофор, с более узкой полосой излучения и максимумом вблизи 610–620 нм, нужен для повышения красной составляющей спектра. Второй люминофор добавляет необходимую энергию излучения в красной области без расходования избыточной мощности в диапазоне длин волн более 650 нм (рис. 6).

Первый подход позволяет получить CRI свыше 90 для СД с КЦТ 2700–3000 К с сохранением высокой светоотдачи. Второй подход предусматривает достижение CRI более 95, но со светоотдачей ниже, чем у светодиодов, имеющих более низкий CRI.

За рамками CRI

CRI как мера цветопередачи обладает несколькими известными недостатками. Наиболее очевидный — использование только восьми эталонов спектрального отражения для представления бесконечного числа возможных

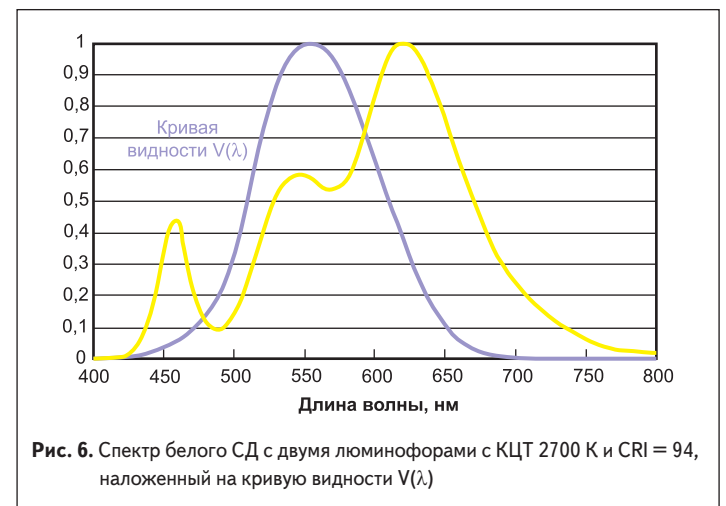


Рис. 6. Спектр белого СД с двумя люминофорами с КЦТ 2700 К и CRI = 94, наложенный на кривую видности $V(\lambda)$

спектральных отражений действительных объектов, с которыми приходится сталкиваться в реальных приложениях. Было предложено несколько альтернатив CRI, таких как шкала качества цвета, Color Quality Scale (CQS), разработанная В. Дэвисом и Й. Оно (W.Davis, Y.Ohno) из Национального института стандартов и технологий США (NIST). Однако до тех пор пока CQS или иная метрика не будут приняты в качестве нового стандарта измерения цветопередачи, таким стандартом остается CRI.

Шесть дополнительных эталонов цвета, включенных в методику расчета CRI, в некоторой степени могут использоваться для представления небольшого количества спектральных отражений. Значение частного индекса цветопередачи R9, соответствующего насыщенному красному цвету, нередко представляет интерес при использовании белых СД, поскольку они зачастую очень плохо воспроизводят насыщенный красный свет из-за дефицита излучения в спектре в длинноволновой области. Вдобавок к сравнению значений CRI двух СД также полезно сравнение значений их частного индекса R9, особенно если речь идет об их применении там, где важно качество передачи красного цвета.

Кроме того, существуют применения, в которых достижение значений CRI 100 не обязательно. Это может быть даже в случае освещения домов, магазинов и точек питания, где высокие значения CRI считаются необходимыми.

К примеру, в отдельных случаях может понадобиться освещение, способное увеличить насыщенность цветов. Методика CRI не позволяет различить изменения в цветопередаче, при которых цвета выглядят менее или более насыщенными. Все различия в цветах между тестовым и эталонным источниками трактуются равноправно. Между тем хорошо известно, что в цифровой фотографии предпочтение отдается фотографиям с более насыщенными цветами, и сегодня в цифровой фотографии довольно обычной практикой является увеличение насыщенности цветов с помощью программного обеспечения обработки изображений.

Усиление насыщенности цвета

Упомянутый факт подразумевает, что предпочтительнее освещение, при котором увеличивается насыщенность цветов. Повышая количество излучения на ключевых длинах волн в спектрах источников, можно увеличить насыщенность отдельных цветов (пусть и с попутным уменьшением CRI). С помощью СД это легко реализовать: при желании усилить основные цвета можно добавить дополнительные красный, зеленый и синий свет от соответствующих СД к обычному белому СД (рис. 7).

В примере, изображенном на рис. 7, красный, зеленый и синий СД добавлены к теплому белому СД, спектр которого изображен на рис. 6. Это приводит к изменению КЦТ до 5500 К и CRI до 81. Значительное уменьшение CRI связано с тем, что насыщенность цветовых образцов

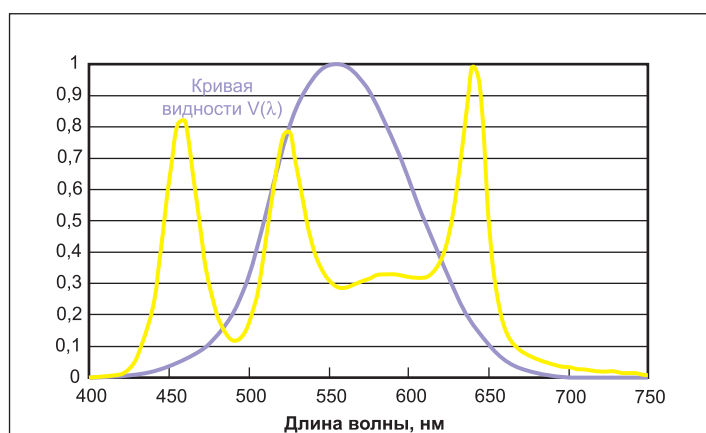


Рис. 7. Добавление красного (640 нм), зеленого (525 нм) и синего (460 нм) светодиодов к белому СД, показанному на рис. 6, приводит к получению света с КЦТ = 5500 К и CRI = 81. Красные, зеленые и синие цвета будут выглядеть более насыщенными при таком освещении, чем при освещении источником со спектром, приведенным на рис. 6

в методике расчета CRI увеличивается, за исключением образцов TCS02 (желтый) и TCS06 (голубой). Насыщенность данных образцов остается в основном неизменной. Эти результаты касаются только определенных образцов из методики расчета CRI, и практически невозможно предсказать, как будет передаваться цвета образцов с иными характеристиками спектрального отражения при освещении таким источником света.

Подобным образом можно изменить спектр СД-светильника, чтобы усилить зрительное восприятие отдельных элементов, таких как, например, еда в ресторанах и продуктовых магазинах. Технология СД впервые обеспечивает индустрию освещения инструментами подбора спектра источников света (по крайней мере в некоторой степени). Было бы интересно пронаблюдать за тем, как эти возможности будут использоваться в течение последующих лет.

Компромисс между CRI и светоотдачей светодиодов в настоящий момент является главным объектом внимания в индустрии. По мере повышения светоотдачи светодиоды получают еще больше преимуществ перед конкурирующими технологиями, такими как люминесцентные лампы. В настоящий момент выгода дальнейшего увеличения светоотдачи СД заключается в том, что более привлекательной возможностью становится обмен некоторого количества этой эффективности на получение более высокого CRI. Кроме того, следует продолжить развитие технологии люминофоров, чтобы ослабить необходимость идти на компромисс между светоотдачей и высоким CRI.

Вычисление CRI

CRI источника света вычисляется из сравнения координат цветности восьми стандартных поверхностей или цветовых образцов при их освещении исследуемым источником света (тестовым источником) и эталонным источником света. В действительности же цветовые образцы не освещаются тестовым и эталонным источниками. Вместо этого вычисляются координаты цветности отраженного от каждого образца света каждого источника путем умножения их спектра излучения на спектр отражения каждого цветового образца. Восемь спектров отражения восьми цветовых образцов были выбраны таким образом, чтобы представлять некоторые распространенные материалы. Количественной мерой цветовой разницы при освещении тестовым и эталонным источниками света является Евклидово расстояние на цветовой диаграмме МКО 1964, ΔE_{CIEUVW} , с координатами цветности U' , V' и W' . Дополнительные шесть цветовых образцов также используются в расчете частных индексов цветопередачи и, фигурируя по отдельности, дают дополнительные данные о цветопередаче насыщенных цветов.

Последовательные шаги расчета CRI источника света по его спектру следующие:

- Определить КЦТ тестового источника света.
- Сгенерировать спектр эталонного источника света.
- Если КЦТ тестового источника ниже 5000 К, то использовать спектр АЧТ с цветовой температурой, равной КЦТ тестового источника.
- Если КЦТ тестового источника выше 5000 К, то использовать спектр стандартного источника D с КЦТ, равной КЦТ тестового источника.
- Вычислить спектр отраженного света для каждого из восьми спектров отражения цветовых образцов как для тестового, так и для эталонного источников. Это делается умножением спектра излучения каждого источника поочередно со спектром отражения каждого образца.
- Найти координаты цветности x , y отраженного света и преобразовать в координаты цветности U' , V' и W' цветовой диаграммы МКО стандарта 1964.
- Применить преобразование фон Криса к величинам U' , V' и W' для учета цветовой адаптации системы человеческого зрения.
- Вычислить цветовые разницы $\Delta E_i = \Delta E_{CIEUVW}$ между тестовым и эталонным источниками для каждого цветового образца.
- Вычислить частный индекс цветопередачи для каждого образца по формуле $R_i = 100 - 4,6\Delta E_i$.
- Усреднить значения восьми R_i для получения общего индекса цветопередачи R_a , являющегося значением CRI для данного тестового источника.

Оригинал статьи опубликован в <http://ledsmagazine.com/features/10/2/11>