

Джордж Келли (George Kelly) | Перевод Мансур Бадгутдинов

Продолжение. Начало в № 4'2013

# Теория цвета и успешное применение светодиодов

## Часть 2

**Подробное изучение диаграммы цветности МКО и расположенной на ней кривой Планка может помочь разработчикам ламп и светильников наилучшим образом использовать преимущества светодиодных источников света.**

Во второй части статьи мы продолжаем изучение теории цвета — в частности, с точки зрения ее применения к светодиодному освещению. В этой части будет уделено внимание диаграмме цветности МКО и теории, лежащей в основе кривой Планка, которая представляет на диаграмме излучение абсолютно черного тела (АЧТ). По прочтении этой части станет понятно, почему светодиоды являются почти идеальными искусственными источниками света в смысле их соответствия спектральному составу излучения АЧТ и ограничения энергии их излучения видимым диапазоном спектра. Это подготовит читателей к следующему выпуску, который будет посвящен разработке продуктов твердотельного освещения, выгодно использующих это уникальное свойство светодиодов.

В первой части настоящего цикла статей, опубликованной в предыдущем номере журнала, было введено три составляющих, лежащих в основе понятия цвета:

- относительный отклик трех типов колбочек в сетчатке, ответственных за цветное зрение;
- метамерия, являющаяся прямым результатом первого принципа;
- цвет может быть описан множеством наборов функций согласования цвета, каждый из которых является линейным преобразованием друг друга.

Также было введено понятие спектра излучения источника света, который является графиком мощности, излучаемой источником света на каждой длине волны во всем диапазоне энергий.

Как говорилось ранее, каждый из трех типов колбочек имеет различные, но, тем не менее, перекрывающиеся кривые спектральной

чувствительности (рис. 1). Цвет, воспринимаемый глазом, определяется соотношением интегральных сигналов от этих трех типов колбочек. В процессе зрительного восприятия теряется огромное количество информации о спектральном составе света, попадающего на сетчатку. Так, спектрометр со спектральным разрешением в 2 нм собирает примерно в 200 раз больше информации о спектре конкретного источника света, чем глаз. Но даже несмотря на то, что глаз практически игнорирует эту информацию, он может различать миллионы цветов. Стандарт МКО 1931 использует этот принцип для создания метрики, которая может определить любой цвет при помощи всего лишь двух чисел, называемых координатами цветности МКО  $x, y$  (рис. 2).

### Применение диаграммы цветности МКО

Диаграмма МКО имеет множество применений; наиболее распространенным в светодиодной промышленности является определение цветов или бинов цветности производителями светодиодов. Кроме того, диаграмма имеет несколько важных дополнительных свойств, которые требуют некоторого пояснения. Во-первых, не все значения координат  $x$  и  $y$  связаны с действительным цветом. Значения  $x$  и  $y$  реальных цветов ограничены спектральным

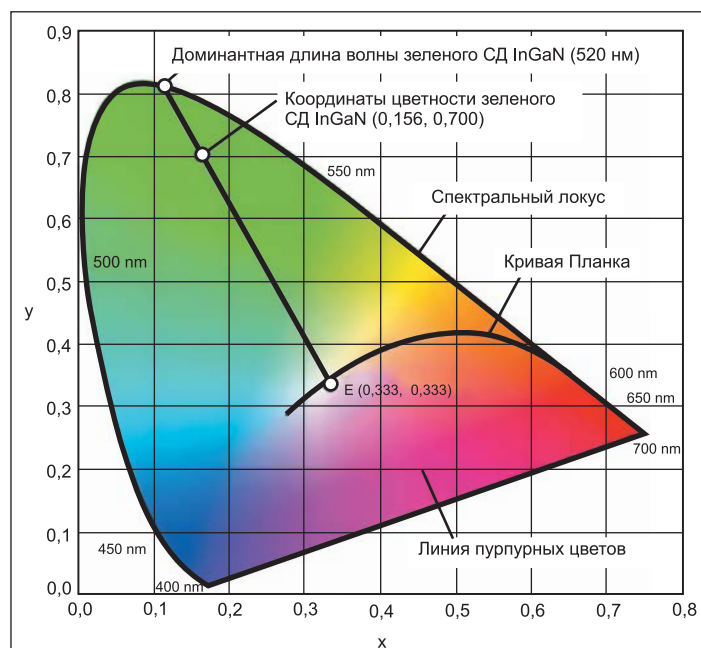


Рис. 2. Диаграмма цветности МКО 1931 г.

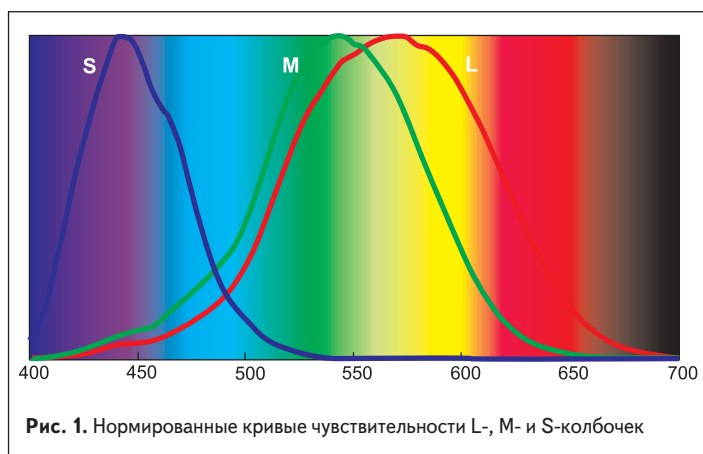


Рис. 1. Нормированные кривые чувствительности L-, M- и S-колбочек

локусом и линией пурпурных (фиолетовых) цветов. Спектральный локус — это кривая, построенная из значений  $(x, y)$  спектрально чистых цветов (света, содержащего только одну длину волны) во всем видимом диапазоне. Спектральный локус довольно просто построить путем пересчета значений  $X, Y, Z$  кривых согласования цвета для каждой длины волны в соответствующие координаты цветности МКО (более детально этот процесс описан в первой части публикации в разделе «Отображение источника света на диаграмме цветности МКО»).

Цветовой тон или оттенок цвета по существу является основным цветом на спектре, изменяясь от красного к оранжевому, желтому, зеленому, голубому, синему и фиолетовому. Пурпурные цвета являются смесью красного и синего цветов и расположены вдоль линии пурпурных цветов. Цвет узкополосного излучения всегда выглядит более чистым по своей тональности, чем цвет излучения того же тона, но с более широким спектром. Чем шире спектр источника, тем дальше будут отстоять его координаты цветности  $(x, y)$  от спектрального локуса. Перемещение от спектрального локуса в направлении белой области в центре диаграммы приводит к менее насыщенному или пастельному оттенку, затем к почти белым и, наконец, к белому цвету. Белый цвет (в этом же смысле и серый) часто описывается как отсутствие цвета как такового. Уровень насыщенности цвета указывает на то, насколько чистым является цвет. Чем дальше располагаются координаты цветности от белого, тем более насыщенным является цвет. Цвета, которые попадают на спектральный локус, являются максимально или полностью насыщенными.

Как уже можно было понять, не существует одного-единственного белого цвета. Ближайшее к абсолютно белому понятие — это так называемый равноэнергетический белый, или источник  $E$ . Он определяется координатами  $(x, y)$  спектра, который имеет равную энергетическую интенсивность на каждой длине волны во всем видимом диапазоне. Каждая из функций согласования цвета МКО 1931 нормирована таким образом, чтобы их интегралы по всему видимому спектру были равны. Это означает, что величины тристимулов для равноэнергетического белого  $(E)$  будут равны  $(X = Y = Z)$ , что в итоге приведет к равенству  $x = y = 1/3$  (рис. 2). Такие равноэнергетические источники представляют чисто теоретический интерес, поскольку они не встречаются в природе и их будет чрезвычайно сложно, если вообще возможно, создать искусственно.

Существует два технических термина, относящихся к тону и насыщенности, которые имеют точные определения по отношению к диаграмме МКО, а именно: доминантная длина волны (тон) и чистота цвета (насыщенность). Доминантная длина волны светодиода определяется

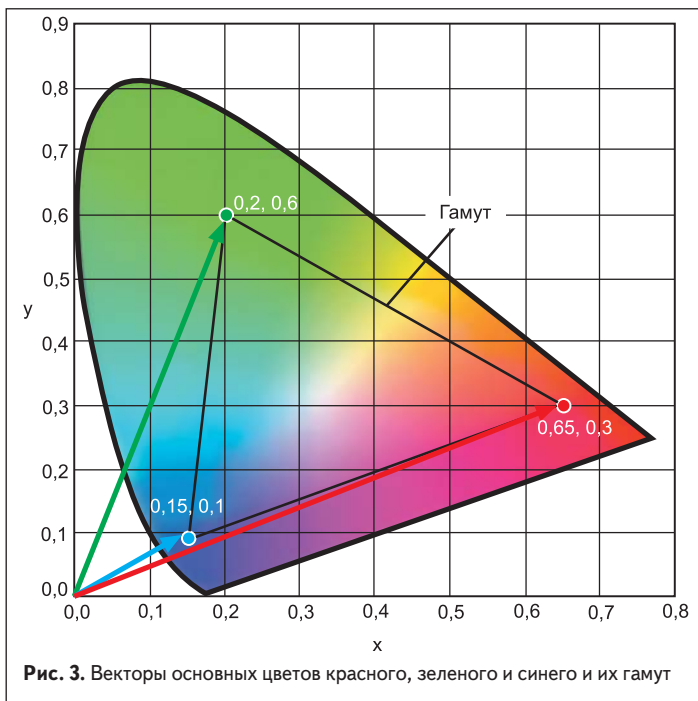


Рис. 3. Векторы основных цветов красного, зеленого и синего и их гамут

как длина волны на спектральном локусе в точке пересечения линии, соединяющей точку  $E$  и координаты цветности  $(x, y)$  светодиода (рис. 2). Чистота цвета определяется положением координат цветности  $(x, y)$  на этой линии. Чистота равна 0, если координаты  $(x, y)$  совпадают с точкой  $E$ . По мере удаления от точки  $E$  в сторону спектрального локуса чистота цвета увеличивается, достигая максимального значения, равного 1, на краю цветовой диаграммы.

## Смешение цветов

Цветовая диаграмма МКО может быть использована для иллюстрации того, что происходит при смешении двух и более цветов или источников света. Если известны координаты  $(x, y)$  двух источников, то координаты  $(x, y)$  их смеси будут находиться на линии, соединяющей координаты этих двух источников. Положение на этой линии зависит от относительной яркости двух источников, естественным образом попадая ближе к более яркому источнику из двух. Если к смеси добавляется третий источник, то область возможных координат  $x$  и  $y$  смеси будет определяться треугольником, вершинами которого являются координаты трех исходных источников. Этот треугольник называется гамут источников (рис. 3).

Вычислить координаты цветности смеси двух и более цветов по координатам цветности отдельных цветов и их относительной яркости довольно просто. Два уравнения ниже демонстрируют метод вычисления координат цветности смеси  $(x_m, y_m)$  из трех источников по их координатам цветности  $x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3$  и их соответствующей относительной яркости  $k_1, k_2$  и  $k_3$ .

$$x_m = \left( k_1 \frac{x_1}{y_1} + k_2 \frac{x_2}{y_2} + k_3 \frac{x_3}{y_3} \right) / \left( \frac{k_1}{y_1} + \frac{k_2}{y_2} + \frac{k_3}{y_3} \right),$$

$$y_m = (k_1 + k_2 + k_3) / \left( \frac{k_1}{y_1} + \frac{k_2}{y_2} + \frac{k_3}{y_3} \right).$$

Эти уравнения могут быть расширены до расчета координат цветности смеси из любого количества источников света. Два уравнения, приведенные выше, могут интерпретироваться как векторная сумма, в которой каждый компонент суммы в числителе является  $x$ - и  $y$ -компонентами векторов, указывающих на координаты цветности каждого из источников (рис. 3). Знаменатель этих уравнений масштабирует каждый из векторов таким образом, чтобы амплитуда слагаемых трех векторов была

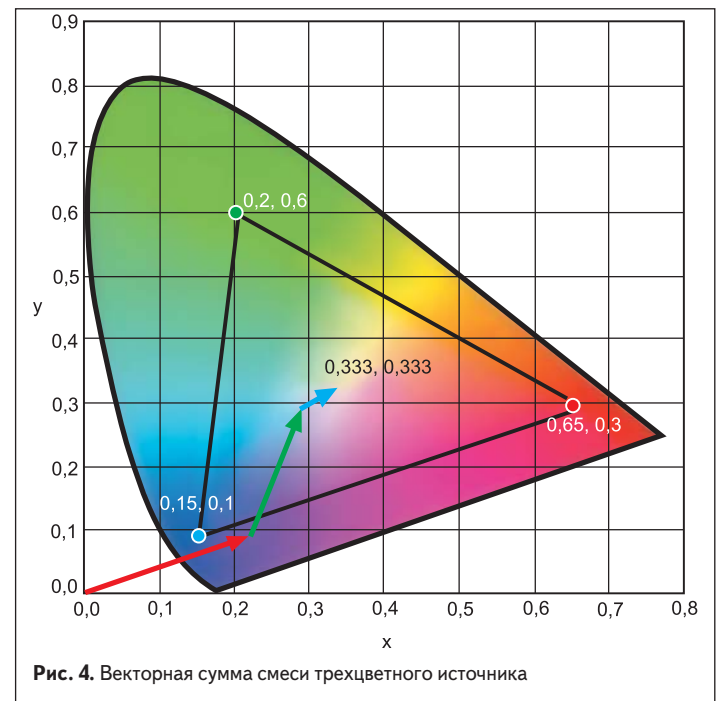


Рис. 4. Векторная сумма смеси трехцветного источника

равна координатам цветности  $(x_m, y_m)$  смеси. На рис. 4 эта сумма показана графически путем построения векторов один за другим, начиная с вектора красного источника, исходящего из начала координат диаграммы МКО, и заканчивая вектором синего источника, указывающего на координаты смеси, которые в данном случае равны  $x_m = 0,333$  и  $y_m = 0,333$ .

Поскольку эти два уравнения образуют линейную систему, то мы можем использовать их для расчета значений относительных яркостей  $k_1$ ,  $k_2$  и  $k_3$ , необходимых для того, чтобы смесь имела желаемые координаты цветности  $x_m, y_m$ . При наличии трех источников в смеси мы имеем три неизвестных и только два уравнения, поэтому задача может казаться недоопределенной. Однако от этого есть простое средство в виде добавления третьего уравнения:

$$k_m = (k_1 + k_2 + k_3).$$

Это третье уравнение просто означает, что сумма яркостей трех основных источников должна быть равна яркости  $k_m$  желаемой смеси. Здесь понятие яркости используется в довольно широком смысле. Фотометрическая величина и единицы измерения коэффициентов  $k_i$  зависят от области применения. Для светильников яркость будет относиться к фотометрическому потоку (люмены). Для экранов — собственно, к яркости (ниты), а для индикаторов — к силе света (кандели).

Как бы то ни было, добавление третьего уравнения образует определенную систему уравнений для нахождения абсолютных значений  $k_1$ ,  $k_2$  и  $k_3$ . Для получения абсолютных значений  $k_m$  приводится к желаемому уровню потока, яркости или силы света. Для получения относительных значений можно просто использовать первые два уравнения, произвольно установив один из коэффициентов  $k_1$ ,  $k_2$  или  $k_3$  равным 1 и решив уравнения для оставшихся двух.

Для смеси из четырех основных цветов, таких как в RGBW-светодиодах, система уравнений будет не определена. Это означает, что существует более одного решения для яркости каждого из светодиодов для получения заданных координат  $(x, y)$  и яркости смеси. Следовательно, требуется дополнительное ограничение для разрешения системы уравнений относительно  $x_m, y_m$ .

## Планковская кривая

Другая общая деталь, которую часто можно встретить на диаграммах МКО, — это кривая Планка, которая начинается вблизи от длинноволнового (красного) края спектрального локуса и, изгибаясь вверх и влево, проходит через белую область в центре диаграммы (рис. 2). Планковская кривая представляет собой график координат цветности источников света, именуемых абсолютно черным телом, которые излучают свет благодаря тепловой энергии. Свет — это электромагнитное излучение и, формально, излучение только в видимой части всего спектра электромагнитных излучений. Нет такого понятия, как «инфракрасный свет» или «ультрафиолетовый свет», хотя и возникает некоторая путаница при использовании этих терминов.

Любое электромагнитное излучение возникает при ускорении (или торможении) электрически заряженных частиц. Есть два основных механизма ускорения (торможения) заряженных частиц: тепловая энергия атомов и молекул (как в тепловых излучателях, например в АЧТ) и электронный переход с одного энергетического уровня в атоме на более низкий. Молекулы любого твердого тела, жидкости или газа при температуре выше нуля градусов Кельвина находятся в постоянном движении, непрерывно колеблясь и сталкиваясь друг с другом. Каждое колебание и соударение ускоряет заряженную частицу, приводя к излучению электромагнитной энергии. Это весьма случайный процесс, однако в макроскопическом масштабе он может быть очень точно предсказан математической моделью излучения АЧТ, известной как закон Планка и описываемой уравнением, приведенным ниже.

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1},$$

где:  $\lambda$  — длина волны в метрах;  $h$  — постоянная Планка;  $c$  — скорость света в вакууме;  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — температура тела в Кельвинах.

Это уравнение определяет спектр источника теплового излучения при заданной цветовой температуре  $T$ . Координаты цветности АЧТ при заданной температуре могут быть найдены с использованием закона Планка с последующим вычислением значений тристимулов по уравнениям, приведенным в первой части статьи. График координат цветности АЧТ в диапазоне температур от приблизительно 1000 К и до бесконечности называется кривой Планка. При 1000 К цвет АЧТ темно-красный; ниже 1000 К излучение в видимом свете пренебрежимо мало. По мере возрастания температуры цвет становится оранжевым, желтым, белым и, наконец, синевато-белым.

Если световой источник не является АЧТ, но его координаты цветности находятся вблизи кривой Планка, то его цвет может быть описан при помощи так называемой коррелированной цветовой температуры (КЦТ). КЦТ источника света — это цветовая температура на кривой Планка, к которой координаты цветности источника света находятся ближе всего с точки зрения зрительного восприятия. Дело в том, что диаграмма цветности МКО 1931 не является однородной по зрительному восприятию, а значит, вычисление КЦТ путем простого нахождения цветовой температуры на кривой Планка, которая геометрически расположена ближе всего к координатам цветности источника, приведет к неверным результатам. Было предложено и использовано несколько различных методов вычисления КЦТ источника света по его координатам цветности. Приведенное ниже уравнение было выведено Келвином МакКами (Calvin McCamy) и является одним из наиболее простых способов, дающих хорошие результаты для большинства применений с использованием светодиодов.

$$\text{КЦТ}(x, y) = -449n^3 + 3525n^2 - 6823,3n + 5520,33,$$

где  $n = (x - 0,332) / (y - 0,1858)$ .

Источники естественного света в большинстве своем являются тепловыми источниками излучения, и следовательно, их излучение приближенно описывается законами излучения АЧТ. Поверхность Солнца также приближенно является АЧТ, но спектр солнечного излучения вблизи поверхности Земли изменяется поглощением и рассеянием атмосферы. Земная атмосфера рассеивает преимущественно синее излучение, чем и объясняется синий цвет неба. В полдень солнечный свет проходит через наименее тонкий слой атмосферы, в то время как во время рассвета или заката солнечный свет проходит через значительно больший поперечный срез атмосферы, который рассеивает большую часть синего света. В результате этого прямой солнечный свет на закате, равно как и облака, подвеченные заходящим солнцем, приобретают красно-оранжевый оттенок. Вследствие этого спектр прямого солнечного излучения существенно меняется в течение дня.

## Спектральный состав естественного света

В 1970-е годы несколько ученых, занимающихся цветом, собрали обширные данные по спектральному составу солнечного излучения на протяжении дня. Они обнаружили, что координаты цветности солнца в течение дня и при различных погодных условиях попадают на кривую прямо над кривой Планка, с изменением КЦТ от немного менее 5000 до 7000 К. Эти данные были использованы Джаддом, Вышецки и МакАдамом (Judd, Wyszecki, McAdam) для построения модели солнечного излучения, известной как стандартные источники излучения D. Эта модель воспроизводит спектр солнца в широком диапазоне КЦТ. На рис. 5 изображена спектральная кривая источников D при 5000, 6000 и 7000 К с наложением соответствующих спектров АЧТ. Заметим, что кривые довольно хорошо совпадают друг с другом, за исключением коротковолновой области спектра.

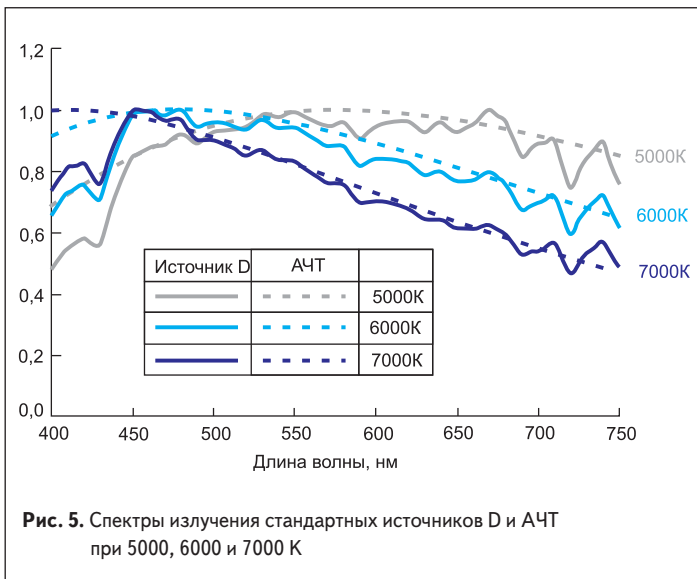


Рис. 5. Спектры излучения стандартных источников D и АЧТ при 5000, 6000 и 7000 К

Большую часть человеческой истории единственным источником света, доступным после заката солнца, был огонь в том или ином виде. Свечи, факелы, масляные и газовые лампы использовались для освещения домов и улиц. Спектр излучения пламени такого типа близок к спектру АЧТ при температуре около 1000–1100 К.

Изобретение электрической лампочки стало большим шагом вперед, создав искусственный тепловой излучатель за счет нагрева нити накала до 2700 К при пропускании через нее тока. Удобство ламп накаливания и количество получаемого от них света стало огромным технологическим прорывом вперед, который в корне изменил производительность труда на предприятиях и качество отдыха в свободное время.

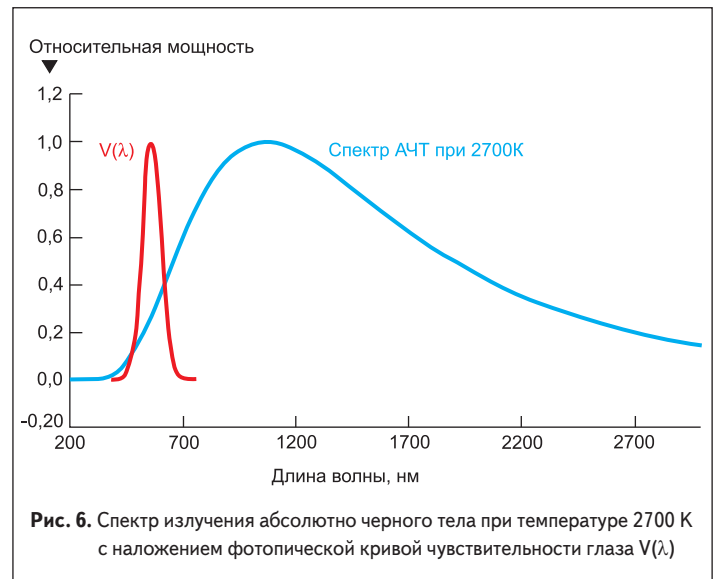


Рис. 6. Спектр излучения абсолютно черного тела при температуре 2700 К с наложением фотопической кривой чувствительности глаза  $V(\lambda)$

Однако, несмотря на то, что лампы накаливания стали в свое время великим технологическим изобретением, они были по существу неэффективными в качестве источников освещения, поскольку, как и любой тепловой источник света, который излучает в видимом свете, они также излучали большое количество электромагнитной энергии вне видимого диапазона, преимущественно в инфракрасной области. Световая отдача источника света определяется количеством излучаемого им света в люменах, поделенного на потребляемую источником мощность. Количество излучаемого света — это простое произведение спектра источника излучения на кривую чувствительности человеческого глаза (фотопическую кривую  $V(\lambda)$ ). Спектр излучения АЧТ с наложением кривой  $V(\lambda)$  показан на рис. 6, который иллюстрирует, почему лампа накаливания является таким неэффективным источником света. Большинство излучаемой лампой накаливания энергии находится в инфракрасной области (>700 нм) и, следовательно, невидимо человеческому глазу.

Хотя наши глаза чувствительны только к узкой доле спектра АЧТ, максимум чувствительности глаза находится при 555 нм, что соответствует солнечному свету с КЦТ 5050 К. И на самом деле, недавние исследования показали, что наш циркадный ритм синхронизован с изменением цветовой температуры солнечного света в течение всего дня. А значит, идеальный источник света для общего освещения имел бы спектральное распределение энергии АЧТ, которое настраивается по цветовой температуре в течение всего дня, но излучает только в видимой области от примерно 400 до 700 нм для получения высокой светоотдачи.

## Светодиоды и узкополосное излучение

Светодиоды являются первым искусственным источником света, который соответствует этому идеалу. По своей сути они — узкополосные источники излучения, и в действительности для получения широкого спектра, перекрывающего видимую область, необходимо добавлять к ним люминофор. В то же время узкополосное излучение светодиодов означает, что излучение различных цветных светодиодов и люминофоров может быть перемешано между собой для получения источника света с настраиваемым спектром, который также имеет оптимальную эффективность, поскольку он не расходует энергию на излучение вне видимого диапазона.

В следующих частях статьи будет обсуждаться применение науки о цвете для создания светодиодных источников света, в которых наилучшим образом используется возможность получения как высокой световой эффективности, так и превосходного качества цвета. ●

Оригинал статьи опубликован в журнале *LEDs Magazine*  
<http://ledsmagazine.com/features/9/7/14>