

Джордж Келли (George Kelly)

Перевод: Мансур Бадгутдинов | mansurbadgutdinov@gmail.com

# Теория цвета

## и успешное применение светодиодов

**Наука о цвете особенно важна в освещении с использованием светодиодов, и участникам индустрии светодиодного освещения необходимы базовые знания для достижения успеха в создании систем освещения с оптимальными цвето-передачей и качеством.**

По мере того как светодиоды продолжают внедряться в общее освещение, все более важным становится качество производимого ими света. Настоящая публикация является первой в серии статей, в которых рассматривается наука о цвете с точки зрения ее применения к светодиодной технологии. Статья начинается с объяснения истоков Диаграммы Цветности МКО и теории, которая привела к стандарту МКО 1931, лежащему в ее основе. В последующих статьях будут обсуждаться источники естественного и искусственного света, их свойства цветопередачи, а также то, каким образом применять теорию цвета к улучшению качества и свойств цветопередачи светодиодных источников света.

Светодиодная промышленность сконцентрировала множество усилий на сортировке светодиодов по цветности: во-первых, за счет тщательного тестирования светодиодной продукции на производственной линии, а во-вторых, в свою очередь, благодаря уменьшению их разброса по цветности в процессе производства. Это очень важные шаги для широкого применения белых светодиодов, в особенности в общем освещении. Но при этом координаты цветности светодиодов несут

в себе только часть необходимой информации. Координаты цветности количественно определяют цветное восприятие светодиодов лишь при непосредственном взгляде на них, но не всегда позволяют хорошо предсказать цветное восприятие освещенных ими объектов.

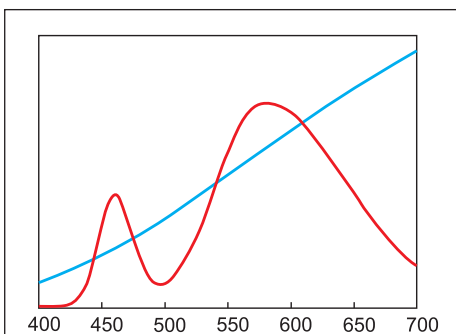
В действительности, два источника света могут иметь в точности совпадающие координаты цветности, но при этом сильно отличаться по своим спектральным распределениям мощности излучения (или спектрам), как показано на рис. 1. Если мы непосредственно взглянем на свет, исходящий от этих двух источников, то будет казаться, что они имеют совершенно одинаковый цвет. Но если мы используем эти два источника для освещения цветных объектов, то их видимые цвета могут существенно отличаться друг от друга. Чем больше отличаются спектры двух источников света с одинаковыми координатами цветности, тем больше вероятность того, что цвета освещенных ими объектов также будут отличаться.

Причиной этого является то обстоятельство, что цвет объекта зависит не только от свойств его самого. Цвет объекта является продуктом комплексного взаимодействия спектральных характеристик источника света, его спектрального отражения и, наконец, спектральной чувстви-

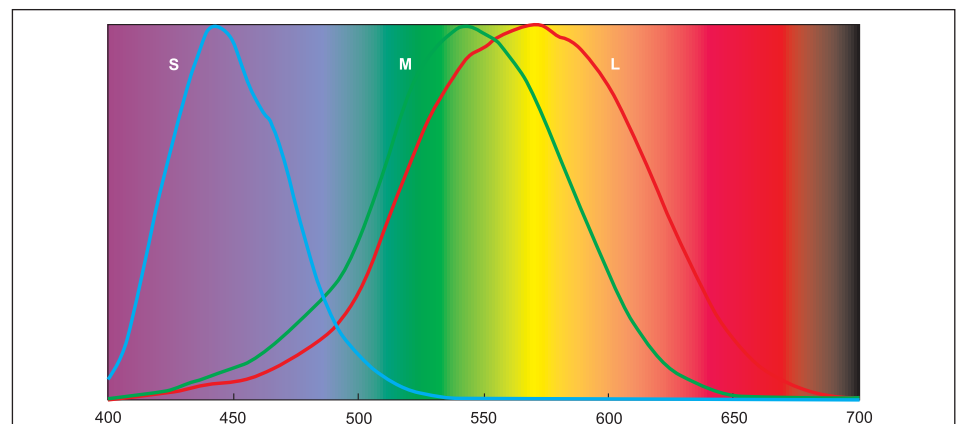
тельности глаза. Затем система зрения человека преобразует сигнал от сетчатки для создания образа конечного воспринимаемого цвета. В разговорной речи мы говорим о цвете так, как если бы он был свойством самого объекта: яблоко красное, а банан желтый. В действительности же присущим свойством яблока, из-за которого оно выглядит красным, является то, что оно отражает больше длинноволнового света, чем средне- или коротковолнового. Банан, с другой стороны, будет отражать свет вблизи длин волн 580–590 нм, и если мы осветим банан красным цветом, то он будет выглядеть красным. Таким образом, очевидно, что «желтизна» или «краснота» — это нечто большее, чем просто свойство самого объекта.

### Функция сетчатки

Сейчас может сложиться ощущение, что вы читаете пространную работу студента-первокурсника. Чтобы вернуться назад в реальность, нам необходимо детально разобраться в том, как сетчатка в действительности воспринимает свет. Сетчатка содержит два типа светочувствительных рецепторов, называемых палочками и колбочками. Колбочки ответственны за цветное зрение и высокое зрительное разрешение, в то время как палочки, которые гораздо более чувствительны к свету, чем колбочки, не влияют на восприятие цвета. Палочки ответственны за ночное или сумеречное зрение, а также за периферийное зрение и обнаружение движения.



**Рис. 1.** Спектр лампы накаливания (синяя кривая) и светодиода (красная кривая); координаты цветности МКО обоих источников  $x = 0,437$  и  $y = 0,404$



**Рис. 2.** Нормированные кривые чувствительности L-, M- и S-колбочек. Цвет фона соответствует значениям длин волн, отложенных по оси абсцисс

Существует три вида колбочек, каждый из которых обладает собственным диапазоном кривой спектральной чувствительности, которые хоть и перекрываются, но, тем не менее, различаются между собой. На рис. 2 изображена спектральная чувствительность каждого типа колбочек. Несмотря на то, что спектральная чувствительность каждого из этих типов довольно приблизительно соотносится с красным, зеленым и синим цветами, физиологи предпочитают обозначать их «L», «M» и «S» колбочки — соответственно для длинно-, средне- и коротковолнового диапазонов длин волн. Относительное соотношение чувствительности этих трех типов колбочек к данному спектру источника определяет цвет, который мы воспринимаем.

Мы сможем лучше понять это, если детальнее рассмотрим рис. 2, на котором также показаны цвета, связанные с каждой длиной волны. В коротких длинах волн, когда возбуждаются только S-колбочки, мы видим фиолетовый цвет. По мере увеличения длины волны M-колбочки начинают давать отклик вдобавок к S-колбочкам, и фиолетовый сменяется синим. По мере дальнейшего увеличения отклика M-колбочек по отношению к S-колбочкам воспринимаемый цвет смещается к зеленовато-синему, затем к сине-зеленому и, наконец, к чистому зеленому, когда соотношение отклика M-колбочек к L- и S-колбочкам достигает своего максимума.

Эта тенденция продолжается с увеличением длины волны до тех пор, пока L-колбочки не начнут давать значительный отклик на световое раздражение. Желтый цвет возникает приблизительно вблизи точки, в которой есть баланс между M- и L-колбочками. По мере увеличения длины волны отклик M-колбочек быстро уменьшается, приводя к скорому переходу от желтого цвета к оранжевому и затем красному. Начиная с длины волны 640 нм и больше отклик M-колбочек настолько мал, что цвет воспринимается как чисто красный и внешне меняется очень слабо, независимо от длины волны, поскольку теперь за восприятие ответственны только L-колбочки. Из этого рассмотрения легко видеть, что

цвет любой длины волны строго определяется соотношением откликов колбочек на данной длине волны.

### Сложение откликов колбочек

Перед тем как поступить в оптический нерв для передачи в зрительную зону коры головного мозга, нервные сигналы, поступающие от колбочек, подвергаются дальнейшей обработке. L-, M- и S- отклики комбинируются в три канала, один из которых кодирует данные о яркости (интенсивности или светимости), а два других — о цвете. На рис. 3 приведено схематичное представление этого процесса. До сих пор идут дискуссии о точной природе этого кодирования, но в главных чертах есть общее согласие. L- и M-каналы добавляются вместе в среднее взвешенное для создания сигнала о яркости, в который S-колбочки дают малый (скорее, ничтожный) вклад.

Суммарный отклик колбочек, который составляет яркостный канал, образует так называемую фотопическую кривую видности  $V(\lambda)$  при дневном освещении. При уровнях ночного освещения колбочки слабо чувствительны и дают малый вклад в зрение. В этих условиях в работу вступают палочки, которые гораздо более чувствительны к свету, чем колбочки, и они начинают оказывать преобладающее влияние в зрении. Вклад палочек в канал яркости описывается скотопической кривой видности, обозначаемой  $V'(\lambda)$ . Все фотометрические измерения, такие как сила света (кандели), световой поток (люмены), освещенность (люксы) или яркость (ниты), используют кривую либо  $V(\lambda)$ , либо  $V'(\lambda)$  (в зависимости от уровня освещения) в качестве весовой функции для спектра света, который необходимо измерить. Световой поток, например, вычисляется путем интегрирования во всем видимом диапазоне произведения спектра на соответствующую кривую видности.

Два цветовых канала состоят из L-канала минус M-канал и L-плюс M-минус S-канал. Эти два канала часто рассматриваются как

красно-зеленый и желто-синий, и считается, что они ответственны за цвета, противоположные красному/зеленому и желтому/синему, означая, что мы не видим красно-зеленые или желто-синие цвета.

До сих пор мы обсуждали отклик глаза только на единичные длины волн. Но что происходит, когда свет состоит из излучения множества длин волн, а не одной? В случае, когда «широкополосный» свет попадает на сетчатку, отклик каждого типа колбочек является интегралом от спектра источника света, помноженного на спектральный отклик каждого типа колбочки на каждой длине волны. Более детальный процесс вычислений приведен далее.

### Вычисление отклика колбочек

Расчет отклика колбочек — это шаг, который помогает понять концепцию согласования цветов. К примеру, следующее уравнение показывает вычисление светового потока (лм) путем интегрирования спектра  $SPD(\lambda)$ , умноженного на кривую  $V(\lambda)$ , в видимом диапазоне 380–780 нм. Сила света, яркость и освещенность могут быть вычислены подобным образом при представлении спектра  $SPD(\lambda)$  в нужных единицах (кд, ниты и лк, соответственно).

$$\Phi = 683 \int_{380 \text{ нм}}^{780 \text{ нм}} V(\lambda) SPD(\lambda) d(\lambda).$$

Подобным образом отклик L-, M- и S-колбочек может быть вычислен с использованием кривых чувствительности колбочек вместо функции  $V(\lambda)$ :

$$L\text{-отклик} = R_L = \int_{380 \text{ нм}}^{780 \text{ нм}} L(\lambda) SPD(\lambda) d(\lambda);$$

$$M\text{-отклик} = R_M = \int_{380 \text{ нм}}^{780 \text{ нм}} M(\lambda) SPD(\lambda) d(\lambda);$$

$$S\text{-отклик} = R_S = \int_{380 \text{ нм}}^{780 \text{ нм}} S(\lambda) SPD(\lambda) d(\lambda).$$

При анализе цвета обычно измеряют спектр источника света с помощью спектрорадиометра, который замеряет мощность излучения, приходящуюся на узкие интервалы длин волн порядка нескольких нанометров. В этом случае интегралы из тройки уравнений выше заменяются эквивалентными суммами в соответствии с уравнениями:

$$R_L = \sum_{i=1}^N L_i SPD_i \Delta\lambda;$$

$$R_M = \sum_{i=1}^N M_i SPD_i \Delta\lambda;$$

$$R_S = \sum_{i=1}^N S_i SPD_i \Delta\lambda.$$

Нижний индекс  $i$  обозначает  $i$ -й интервал длин волн как для кривой чувствительности колбочек, так и для спектра, а  $\Delta\lambda$  — ширина этого интервала. Дискретный набор спектральных интервалов можно рассматривать как  $N$ -мерный вектор, где  $N$  — количество интервалов длин волн, и тогда суммарный отклик каждого типа колбочек будет представлять собой скалярное

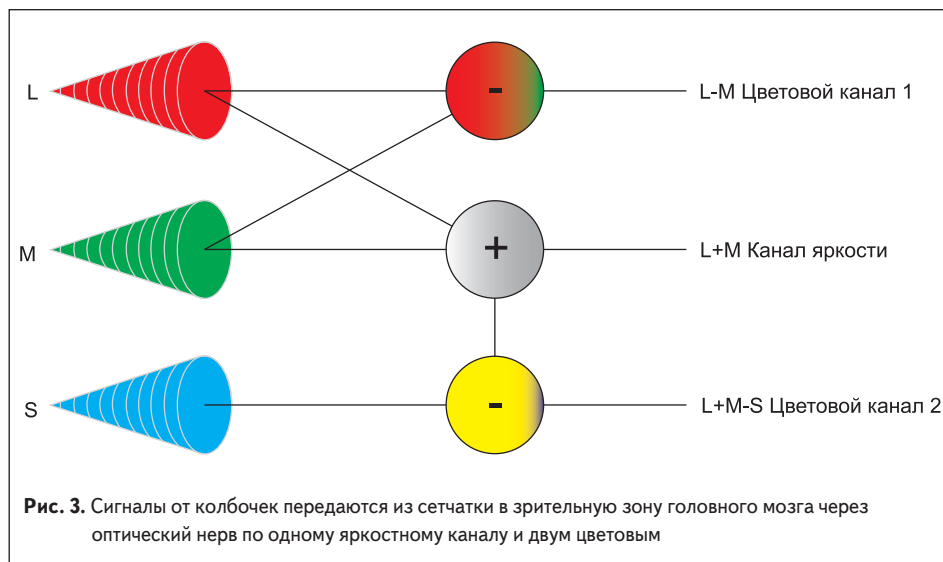
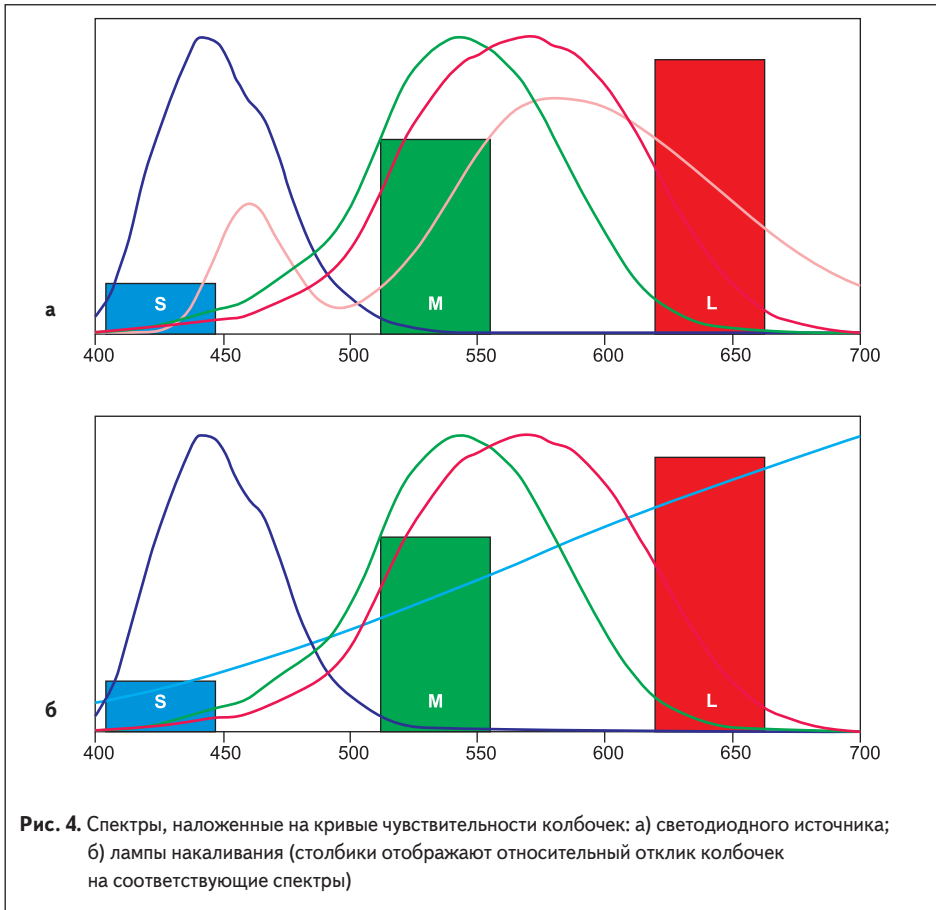


Рис. 3. Сигналы от колбочек передаются из сетчатки в зрительную зону головного мозга через оптический нерв по одному яркостному каналу и двум цветовым



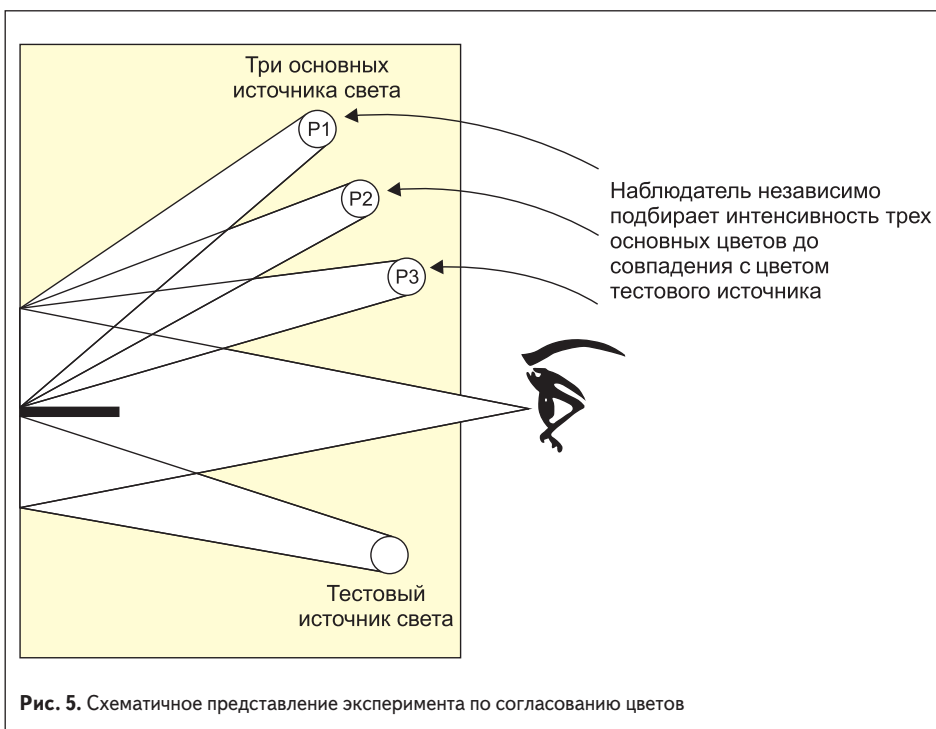
**Рис. 4.** Спектры, наложенные на кривые чувствительности колбочек: а) светодиода; б) лампы накаливания (столбики отображают относительный отклик колбочек на соответствующие спектры)

произведение спектра с кривыми чувствительности колбочек.

### Спектр источника

На рис. 4а изображен спектр типичного теплого (3000 К) светодиода, наложенный на кривые чувствительности колбочек вместе с гистограммой,

отображающей итоговый отклик каждого типа колбочек к спектру светодиода. Аналогично, рис. 4б показывает отклик колбочек к спектру лампы накаливания при температуре 3000 К. Отметим, что отклики колбочек для светодиода и лампы накаливания идентичны, даже несмотря на то, что спектры источников сильно отличаются. Эти два источника будут выглядеть



**Рис. 5.** Схематичное представление эксперимента по согласованию цветов

как имеющие одинаковый цвет, поскольку отклик колбочек идентичен для каждого из них. Два источника света с различными спектрами, но, тем не менее, имеющие одинаковый цвет, называются метамерами.

Метамеры очень важны в теории цвета, в частности, в области цветной печати, цветных дисплеев, фотографии, в подборе красок и, наконец, в светодиодном освещении. Когда цвет воспроизводится, например, цветным дисплеем, то нет необходимости в точности воспроизводить спектр исходного цвета. Дисплею необходимо всего лишь воспроизвести спектр, который будет метамером исходного спектра.

Жидкокристаллические (ЖК) дисплеи используют пиксели трех цветов: красного, зеленого и синего, обычно называемых основными, или первичными цветами. Смешиваясь в нужных пропорциях, эти цвета создают метамеры к широкой области возможных цветов, обусловленных различными спектрами. Спектру, создаваемому смесью основных цветов, достаточно воздействовать на L-, M- и S-колбочки в той же пропорции, что и исходному спектру, для точного воспроизведения его цвета.

Как можно себе представить, задача нахождения правильных комбинаций трех основных цветов ЖК-дисплея для создания метамера к данному спектру не является простой. История теории цвета, по большей части, является историей решения этой проблемы. В ранний период становления этой науки, в начале XX в., спектральная чувствительность колбочек не была известна. Фактически даже количество типов колбочек не было известно, но предполагалось, что их три, поскольку из всех базовых цветов было достаточно смешивать только три аддитивных или три субтрактивных цвета. Первым шагом на этом пути было определение спектральной чувствительности глаза.

Первым, кто эмпирически получил соотношение смеси трех источников света для создания произвольных цветов, был Джеймс Клерк Максвелл (James Clerk Maxwell). Более того, он создал цветовой треугольник, который предвосхитил Диаграмму Цветности МКО. В течение последующих 70 лет несколько ученых совершенствовали его методы, которые в итоге увенчались экспериментами, заложившими основу стандарта МКО 1931 года. В этих экспериментах, известных как эксперименты по согласованию цветов, использовался монохроматор, который выделял тестовое излучение, состоящее из единичной длины волны, которое освещало половину небольшого экрана с угловым размером с точки зрения наблюдателя в 2°. Для каждой длины волны тестового излучения в диапазоне 700–400 нм наблюдатель подбирал интенсивность трех других монохроматических источников (основных цветов), освещающих вторую половину экрана, до тех пор, пока их смесь не совпадала с цветом тестового источника. Рис. 5 иллюстрирует принципиальную схему эксперимента по согласованию цветов.

## Преобразование цветового пространства

Результатами экспериментов по подбору цветов явились три кривые, или функции, которые показывают относительную интенсивность каждого из основных цветов, необходимую для их соответствия цвету определенного монохроматического излучения во всем видимом диапазоне. Если основные цвета изменить на другой набор, то в результате эксперимента получится другой набор функций согласования цвета. Мы будем обозначать набор функций согласования цвета, полученный в ходе определенного эксперимента, как ФСЦ. Как соотносятся между собой два набора ФСЦ из экспериментов с различными основными цветами? Оказывается, все ФСЦ связаны между собой линейным преобразованием, и уравнение ниже представляет такое линейное преобразование в матричной форме. Оно преобразует набор ФСЦ, состоящий из  $a(\lambda)$ ,  $b(\lambda)$  и  $c(\lambda)$ , в новый набор ФСЦ  $a'(\lambda)$ ,  $b'(\lambda)$ ,  $c'(\lambda)$ .

$$\begin{bmatrix} a'(\lambda) \\ b'(\lambda) \\ c'(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a(\lambda) \\ b(\lambda) \\ c(\lambda) \end{bmatrix}.$$

Матрица  $3 \times 3$  коэффициентов  $k_{ij}$  часто называется преобразованием цветового пространства. Нахождение коэффициентов этой матрицы не представляет особой сложности и будет детально рассмотрено в последующей статье. На данный момент все, что необходимо знать, — это то, что все ФСЦ и связанные с ними цветовые пространства представляют собой линейные преобразования друг друга.

Стандарт МКО 1931 вводит всего лишь один из бесчисленного множества возможных цветовых пространств, каждое из которых может быть получено из любого другого набора функций согласования цвета при помощи линейного преобразования. Стандарт МКО 1931 основан на данных двух независимых экспериментов по согласованию цветов, проведенных Дэвидом Райтом (W David Wright) и Джоном Гилдом (John Guild) в 20-х годах. Каждая из этих функций согласования цвета была преобразована в новое цветовое пространство, которое соответствовало другому набору идеализированных основных цветов. Как и ожидалось, после преобразования результаты оказались практически одинаковыми для данных Райта и Гилда, поскольку, как было сказано выше, все функции согласования цвета являются линейным преобразованием друг друга. Различия были обусловлены только точностью экспериментов и естественным различием в восприятии наблюдателей, принимавших в них участие.

Конкретные основные цвета для стандарта МКО 1931 были отобраны не произвольным образом, а так, чтобы получившиеся функции согласования цвета обладали не-

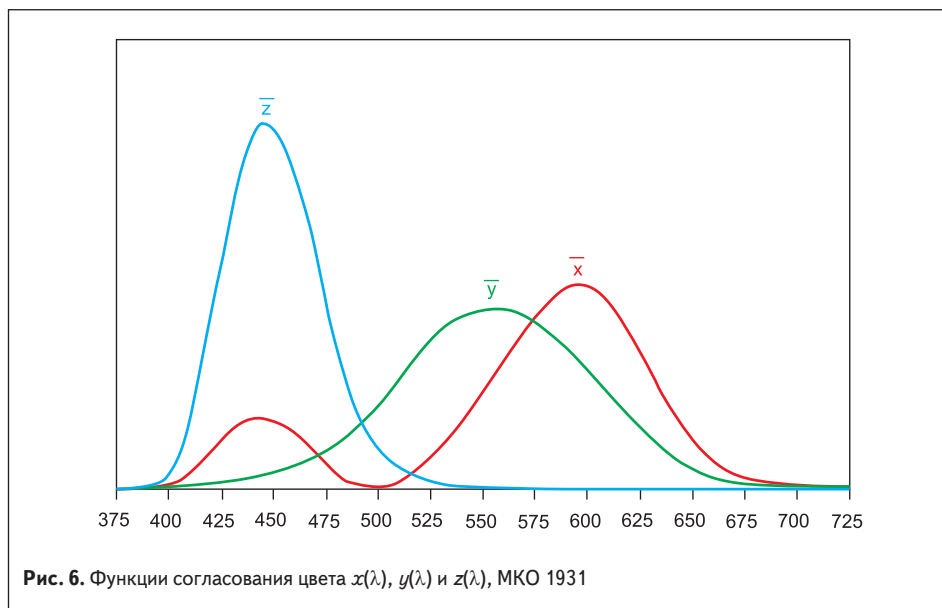


Рис. 6. Функции согласования цвета  $x(\lambda)$ ,  $y(\lambda)$  и  $z(\lambda)$ , МКО 1931

сколькими особенными характеристиками. Одна из этих особенностей состоит в том, что одна из функций, а именно  $y(\lambda)$ , совпадает с фотопической кривой видности  $V(\lambda)$ , о которой говорилось выше. На рис. 6 показаны функции согласования цвета стандарта МКО 1931. Интеграл произведения этих функций со спектром источника света (или отраженного света) определяет значения тристимулов  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  стандарта и однозначно определяет как количественную характеристику света (поток, силу света или яркость), так и его координаты цветности МКО. В главе «Отображение источника света на Диаграмме Цветности МКО» продемонстрирован процесс вычисления значений тристимулов  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  для

данного спектра, а затем соответствующих координат цветности  $x$  и  $y$  для отображения цвета спектра на Диаграмме Цветности МКО (рис. 7).

## Отображение источника света на Диаграмме Цветности МКО

Функции согласования цвета для основных цветов цветового пространства, помноженные на спектр источника света или отраженного света, определяют точку нанесения источника света на Диаграмму Цветности. Для построения  $(x, y)$  координат источника цвета на Диаграмме Цветности МКО необходимо в первую очередь рассчитать значения три-

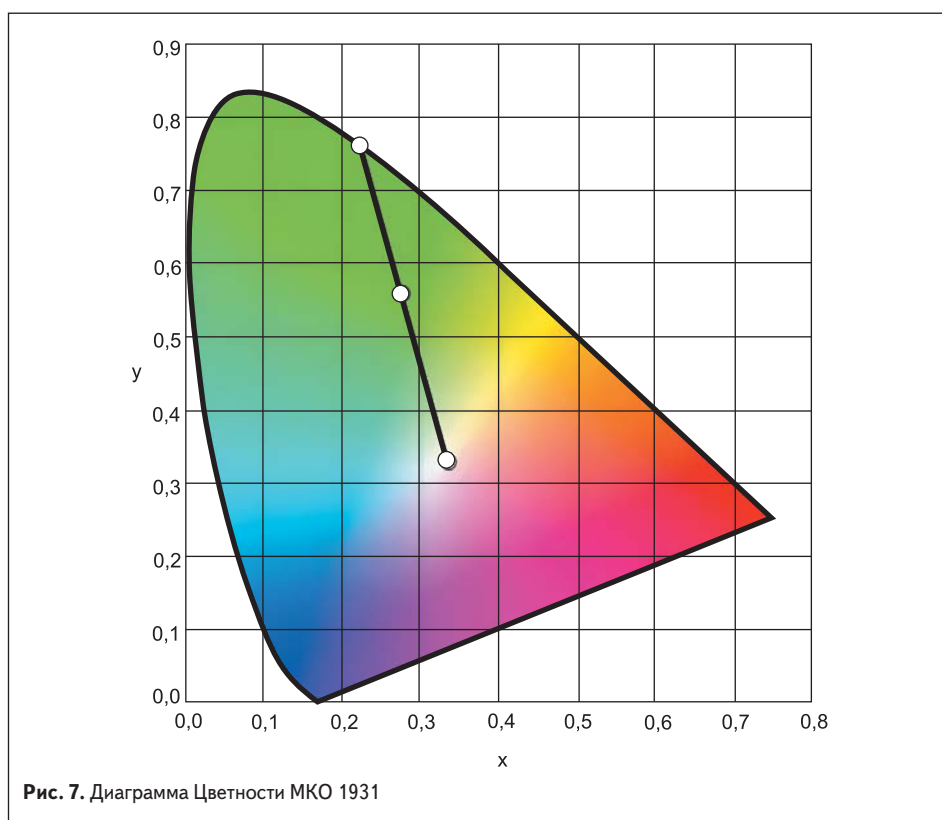


Рис. 7. Диаграмма Цветности МКО 1931

стимулов  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ , используя следующие три уравнения:

$$X = 683 \sum_{i=1}^N L_i SPD_i \Delta \lambda;$$

$$Y = 683 \sum_{i=1}^N M_i SPD_i \Delta \lambda;$$

$$Z = 683 \sum_{i=1}^N S_i SPD_i \Delta \lambda.$$

Затем координаты цветности МКО получаются из значений тристимулов нормировкой при помощи следующих трех уравнений:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z};$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z};$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}.$$

В то время как значения  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  увеличиваются с увеличением яркости, значения  $x$ ,  $y$  и  $z$  не зависят от нее и определяют только цветность. Более того, как следует из последних трех уравнений,  $x + y + z = 1$  и, таким образом, только две из координат  $x$ ,  $y$  и  $z$  необходимы для полного определения цветности. Повсеместно используемая Диаграмма Цветности МКО, изображенная на рис. 7, использует координаты цветности  $x$  и  $y$ , игнорируя координату  $z$ , поскольку она зависима от первых двух.

## Двухкоординатный цвет

Простота определения цвета с помощью всего лишь двух чисел делает Диаграмму Цветности МКО чрезвычайно полезным инструментом индустрии для описания цвета светодиода универсальным и стандартизованным способом. Однако более важным является тот факт, что, изучая происхождение стандарта МКО 1931, мы получили представление о теории, лежащей в основе цветного зрения. Попутно было представлено три фундаментальные концепции о цвете, которые дают глубокое представление о том, как мы его видим. Эти три концепции следующие:

- цвет может быть объяснен относительной чувствительностью колбочек;
- метамерия;
- все функции согласования цвета являются линейным преобразованием друг друга.

При правильном понимании этих концепций они с большим успехом могут быть применены к широкому кругу проблем, с которыми может столкнуться инженер по светодиодам. В последующих выпусках журнала мы используем эти концепции и стандарт МКО 1931 для рассмотрения актуальных тем в индустрии светодиодов, таких как смешение цветов и цветопередача.

Оригинал статьи опубликован в журнале *LEDs Magazine*  
<http://ledsmagazine.com/features/9/5/4>