

Джордж Келли (George Kelly) | Перевод: Мансур Бадгутдинов

Продолжение. Начало в № 4'2013

# Теория цвета и успешное применение светодиодов

## Часть 3

Возможности смешения цветов светодиодов с различными коррелированными цветовыми температурами открывают путь для разработки источника света с отличными цветовыми характеристиками, индексом цветопередачи и эффективностью.

Индустрия светодиодного освещения, несмотря на свой бурный рост, до сих пор развивается в части технологии, которая бы позволяла получать оптимальное качество цвета одновременно с воплощением преимуществ малого энергопотребления. Впрочем, имея необходимые познания в теории цвета и зная возможности смешения цветов светодиодов, можно разрабатывать продукты, которые бы успешно совмещали кажущиеся противоречащими друг другу свойства качества и эффективности.

В первой части статьи было 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.

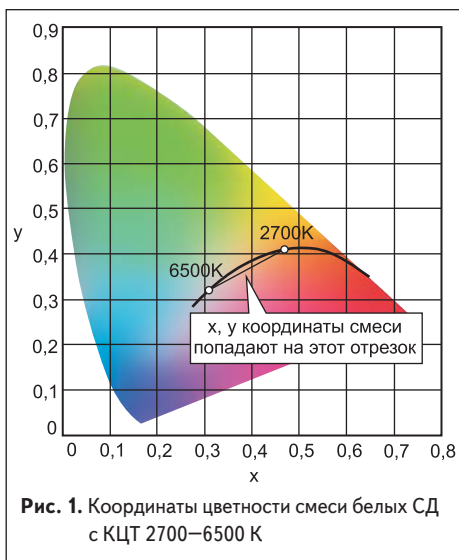


Рис. 1. Координаты цветности смеси белых СД с КЦТ 2700–6500 К

Во второй части статьи эти законы были использованы для объяснения происхождения и использования диаграммы цветности МКО, в том числе для определения положения на ней цветовых координат смеси из нескольких цветов. Также обсуждалось происхождение Планковского локуса — кривой в центре диаграммы, которая отображает цветовые координаты определенного источника белого цвета, известного как абсолютно черное тело (АЧТ). АЧТ испускает свет при нагреве до высокой температуры, и положение его координат цветности на кривой Планка определяется только его температурой. Это объясняет, почему производители светодиодов разрабатывают белые светодиоды так, чтобы их координаты цветности попадали как можно ближе к кривой Планка.

В настоящей части статьи полученные знания будут использованы и расширены для иллюстрации способа проектирования осветительных устройств на основе светодиодов (СД), в которых используется смешение света цветных и белых СД с различной цветовой температурой. Эти способы позволяют получить результаты, недостижимые с использованием одних только белых СД с одинаковой цветовой температурой. В первом примере будет показано устройство светодиодного источника белого света с регулируемой коррелированной цветовой температурой (КЦТ). Во втором примере этот источник будет далее усовершенствован добавлением третьего цветного СД.

### Лампа с изменяемой КЦТ

В отличие от солнечного света и ламп накаливания, СД обладают фиксированной КЦТ. Для создания СД, который имитирует солнечный свет с изменением цветовой температуры в течение дня или лампы накаливания по мере изменения ее яркости, необходимо смешать свет двух или более СД с различными КЦТ. Как было показано в предыдущей части статьи, координаты цветности смеси из двух цветов будут попадать на диаграмме цветности МКО на отрезок, соединяющий координаты цветности смешиваемых источников. Поскольку кривая Планка является изогнутой, а не прямой линией, смесь двух СД будет только приближенно соответствовать кривой Планка

в сравнительно небольшом диапазоне цветов. К счастью, область 2700–6500 К может быть довольно хорошо приближена прямой линией в отрезке между  $x = 0,464$ ,  $y = 0,409$  (~2700 К) и  $x = 0,312$ ,  $y = 0,323$  (~6500 К) (рис. 1).

Если необходимо точно следовать Планковской кривой, то следует добавить к смеси третий СД таким образом, чтобы гамут трех СД полностью включал в себя Планковский локус в диапазоне 2700–6500 К. Добавление к смеси третьего СД с координатами  $x = 0,35$ ,  $y = 0,4$  достаточно расширит гамут для полного вмещения Планковской кривой в указанной области (рис. 2). К сожалению, приобрести произвольные СД с такими точными координатами цветности практически невозможно, поэтому реальную работоспособность такого подхода нельзя гарантировать. Впрочем, глаз плохо различает близкие цвета, и до тех пор, пока координаты цветности близки к кривой Планка, результаты будут удовлетворительными для практического большинства применений.

Главным вопросом остается определение относительных яркостей каждого СД, которые необходимы для перемещения координат цветности по линии между 6500 и 2700 К. Вопрос не представляет сложностей, если нужна простая ручка управления, вращая которую можно

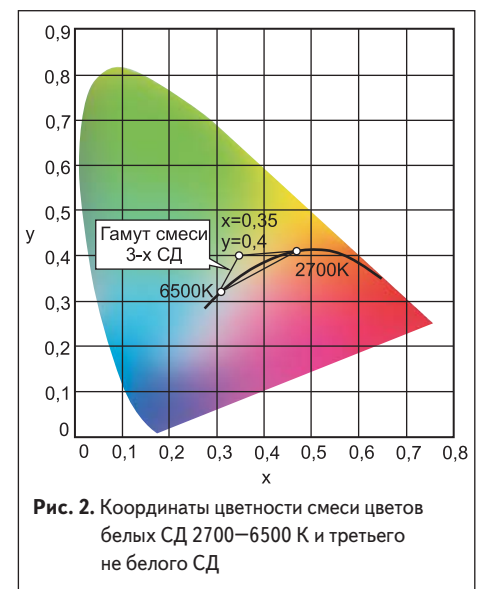


Рис. 2. Координаты цветности смеси цветов белых СД 2700–6500 К и третьего не белого СД

увеличивать яркость одного СД и одновременно уменьшать яркость другого, изменяя цветовую температуру. Если же задача состоит в необходимости устанавливать заданную цветовую температуру, то она несколько усложняется.

Во-первых, для ее решения необходимо определить координаты цветности заданной цветовой температуры. Существует два способа такого определения:

- создать справочную таблицу на основе закона Планка;
- аппроксимировать Планковскую кривую двумя полиномами — один для координаты  $x$  как функции температуры  $T$  и второй для координаты  $y$  как функции от  $x$ .

Это вполне возможно сделать, поскольку значения  $x$  кривой Планка уменьшаются монотонно с ростом  $T$ . Другими словами, каждому значению  $T$  на Планковском локусе соответствует только одно значение  $x$ . То же самое неверно для координаты  $y$ , но при этом каждому значению  $x$  соответствует только одно значение  $y$  на протяжении всей кривой Планка. Полиномы, приведенные ниже, были подобраны под Планковский локус с использованием аппроксимирующих функций в электронной таблице.

$$x(T) = -8,4254 \times 10^{-13}T^3 + 2,0203 \times 10^{-8}T^2 - 1,7034 \times 10^{-4}T + 0,79556;$$

$$y(x) = -2,2985x^2 + 2,3488x - 0,186.$$

Эти приближения довольно точны в диапазоне КЦТ 1700–10 000 К с отклонением не более 0,003 в плоскости  $x$ – $y$ , за исключением самых краев диапазона, где ошибка возрастает до 0,01. Несмотря на то, что уравнения выглядят сложными, их можно существенно упростить для вычислений на микроконтроллере.

Получив координаты цветности АЧТ с желаемой цветовой температурой, можно рассчитать относительную яркость двух источников, необходимую для их достижения. Во второй части статьи приводились два уравнения для нахождения координат цветности смеси СД при заданных относительных яркостях  $k_1$  и  $k_2$  и координат  $x$ ,  $y$  каждого из них. Уравнение для нахождения координаты  $x_m$  смеси:

$$x_m = \frac{k_1 \frac{x_1}{y_1} + k_2 \frac{x_2}{y_2}}{\frac{k_1}{y_1} + \frac{k_2}{y_2}}.$$

Также можно ввести условие на равенство единице суммы относительных яркостей всех СД, что приводит к следующему выражению:

$$k_1 + k_2 = 1.$$

Если рассматривать эти два уравнения как линейную систему, то ее можно разрешить относительно  $k_1$  и  $k_2$  при заданных  $x_m$  и координатах цветности двух СД.

$$k_1 = (x_2 y_1 - y_1 x_m) / [(y_2 - y_1) x_m - (x_1 y_2 - x_2 y_1)];$$

$$k_2 = 1 - k_1.$$

Большинство членов в первом уравнении можно вычислить заранее. Для каждой заново

заданной цветовой температуры  $T$  необходимо вычислять только члены, содержащие  $x_m$ . Это означает, что при необходимости каждый раз вычислять  $k_1$  и  $k_2$  для новой  $T$  вычисление будет состоять из двух операций умножения, двух суммирования и одной операции деления. Они не представляют особой сложности для реализации в микроконтроллере и, с другой стороны, с легкостью могут быть преобразованы в справочную таблицу соответствия для упрощения задачи.

### Адаптация к светодиодам

Все это выглядит довольно просто, если не принимать во внимание тот факт, что практически невозможно приобрести СД с точно заданными координатами цветности. Производители СД продают их отсортированными по группам цветности (цветовым бинам) и, как правило, продают не один бин, а группу. Этот неизбежный разброс в координатах цветности двух СД, используемых в смеси, приведет к соответствующему разбросу ее координат цветности. Однако, используя уже полученные знания, можно добиться сужения границ этой ошибки.

Как нам уже известно, координаты цветности смеси двух СД попадают на прямую линию, соединяющую их координаты цветности. Таким образом, верхняя и нижняя границы координат смеси могут быть определены проведением линий между верхними и нижними границами бинов двух СД (рис. 3). Границы слева и справа для определенной цветовой температуры можно оценить путем решения уравнений для  $k_1$  и  $k_2$ , используя координаты центральных точек бинов, а затем решения для координат смеси ( $x_m$ ,  $y_m$ ) с использованием координат вершин границ бинов. В примере на рис. 3 левая и правая границы прочерчены для целевой КЦТ 5000 К. Левая и правая границы в этом случае соответствуют КЦТ примерно 5150 и 4880 К.

Если величина этой ошибки неприемлема, то существует два основных способа для ее уменьшения. Первый заключается в калибровке каждого источника света в процессе производства путем измерения точных координат цветности

СД в его составе, с последующим сохранением этих значений в энергонезависимой памяти для использования в расчетах  $k_1$  и  $k_2$ . Этот способ довольно затратен и не дает возможности корректировки сдвига координат цветности СД по мере их нагрева или старения. Второй подход заключается в добавлении датчика определения цвета и его использовании в цепи обратной связи для расчета относительной яркости каждого СД для получения желаемой смеси. Этот подход будет рассмотрен в следующем примере с добавлением в смесь третьего СД.

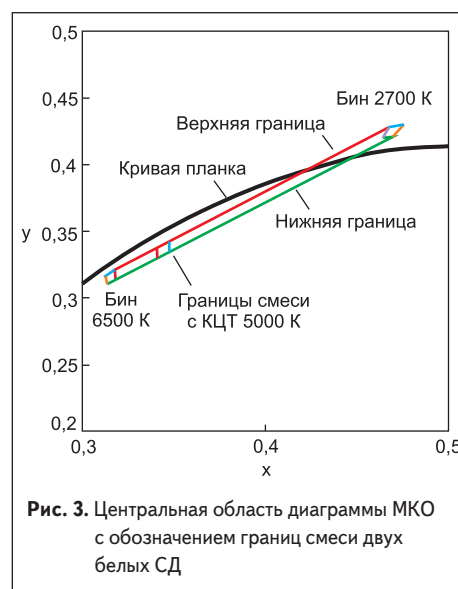
### Источник белого света с изменяемой КЦТ на основе трех СД

Добавление датчика цвета и обратной связи может решить несколько проблем. Во-первых, отпадает необходимость в попарном подборе бинов цветности холодного и теплого белых СД. Использование обратной связи от точного датчика определения цвета может на практике уменьшить ошибку установки цветности смеси до долей размеров бинов цветности самих СД. Кроме того, с помощью датчика можно компенсировать изменения координат цветности СД по мере их нагрева после включения или последовательного старения в течение срока службы.

Дальнейшее расширение возможностей смешения цветов открывается с добавлением третьего СД к смеси, особенно если его координаты цветности не лежат на одной линии с координатами первых двух. Треугольник, составленный координатами цветности трех СД, образует гамут их смеси. При соответствующем выборе относительной яркости каждого из трех СД могут быть достигнуты любые координаты цветности смеси внутри этого треугольника.

В настоящем примере будет рассмотрена технология Brilliant Mix от компании OSRAM — это смесь двух СД янтарного и зеленовато-белого (называемого EQ White) цветов, используемая для достижения высоких светоотдачи и индекса цветопередачи (ИЦП) в теплом белом цвете. Как известно, эффективность обычных белых СД падает по мере уменьшения их цветовой температуры. Это происходит по причине того, что люминофорам необходимо интенсивно излучать свет в красной области спектра, требуемый для получения более низкой цветовой температуры, что также приводит к интенсивному излучению красного света на длинах волн более 650 нм, где чувствительность человеческого глаза быстро падает.

Brilliant Mix решает эту проблему использованием янтарного СД с пиковой длиной волны 625 нм, что приводит к увеличению спектра смеси в красной области без необходимости использовать неэффективный люминофор, который излучает избыточную энергию выше 650 нм. В белых СД EQ White используется люминофор с пиковой длиной волны вблизи 550 нм, которая, к тому же, находится вблизи максимума кривой видности  $V(\lambda)$ , что обеспечивает СД EQ White высокую световую эффективность. Добавление третьего, холодного белого СД к янтарному СД и СД EQ White в составе Brilliant Mix позволяет получить



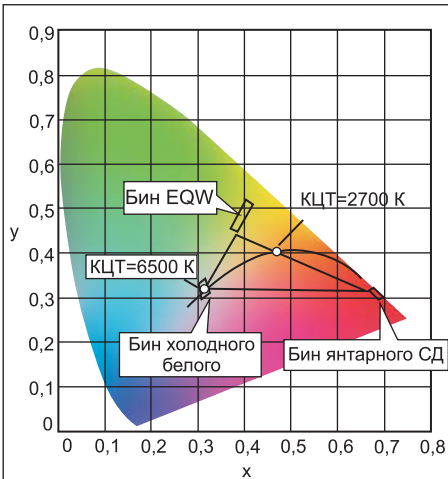


Рис. 4. Треугольник, представляющий наименьший гамут смеси трех СД: холодного белого, OSRAM EQ White и янтарного

белый источник света с изменяемой КЦТ и высокими светоотдачей и цветопередачей (гамут трех СД на рис. 4).

### Повышение точности с помощью датчиков определения цвета

Существует как минимум два способа использования датчика цвета для управления координатами цветности смеси. Первый заключается в измерении точных координат цветности каждого СД и последующем вычислении яркости каждого из них для достижения заданных координат смеси. Измерение цветности каждого СД по отдельности означает, что один из них должен быть включен, в то время как остальные два выключены. Задача здесь в том, чтобы это делать незаметно для пользователя. Это можно сделать при включении, но тогда не будет учтен любой сдвиг в цвете СД по мере его нагрева. Это также можно делать периодически во время работы источника света, переключаясь между всеми СД в быстрой последовательности. Если переключаться достаточно быстро, то глаз будет воспринимать усредненный цвет и не будет заметно работы отдельных СД в каждый момент времени. Такое переключение достаточно проводить раз в 10 с или около того, чтобы минимизировать вероятность его заметности.

Второй способ позволяет избежать этих сложностей путем простого измерения координат цветности всей смеси и использования цепи обратной связи для минимизации любого расхождения между координатами цветности текущего и требуемого цвета.

В обоих методах требуется датчик определения цвета с возможностью калибровки для проведения точных цветовых измерений. Коммерчески доступно несколько датчиков цвета на выбор с возможностью работы в координатах цветности МКО или со значениями тристимулов. Вычисление относительных яркостей каждого СД математически проще прово-

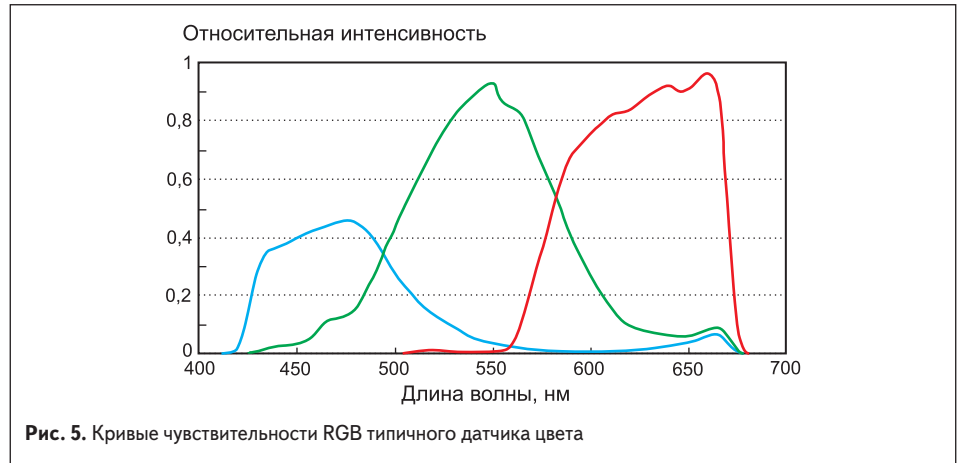


Рис. 5. Кривые чувствительности RGB типичного датчика цвета

дить с использованием значений тристимулов, но тогда потребуется преобразование целевых координат цветности в значения тристимулов XYZ (процедура перевода координат цветности в значения тристимулов была описана в первой части серии публикаций).

Одно из решений заключается в использовании датчика цвета, который непосредственно выдает значения тристимулов, например датчик цвета MTCSiCS производства компании MAZE T. Также коммерчески доступно несколько RGB-датчиков, которые состоят из трех типов различных датчиков, примерно соответствующих красному, зеленому и синему. Примерами являются MAX4406/MAX44008 производства Maxim или ISL29120 от Intersil. Эти датчики содержат цветные фильтры, подобные тем, которые используются в ПЗС и КМОП-датчиках изображения цифровых камер.

Чтобы понять, каким образом можно откалибровать RGB-датчик для получения на выходе значений тристимулов, можно использовать третий фундаментальный закон теории цвета, обсуждавшийся в этой серии статей, — все функции согласования цвета являются линейным преобразованием друг друга. Функции согласования цвета МКО, из которых получаются значения тристимулов XYZ, являются всего лишь одним из таких наборов. Если кривые чувствительности датчика цвета RGB по случайности являются одними из функций согласования цвета, то простое линейное преобразование переведет эти кривые в функции согласования цвета МКО. Применение такого преобразования выходных значений RGB-датчика цвета в величины тристимулов XYZ математически эквивалентно преобразованию кривых чувствительности датчика в функции согласования цвета МКО.

Хотя и существует теоретическая возможность такого совпадения кривых чувствительности случайно выбранных датчиков RGB с функ-

циями согласования цвета, реальная вероятность этого практически нулевая. К счастью, для использования в указанных целях вполне достаточно, чтобы кривые чувствительности были лишь близки к действительным функциям согласования цвета. Один из способов выяснения, насколько кривые чувствительности конкретного датчика цвета RGB близки к функциям согласования цвета, заключается в нахождении линейного преобразования кривых чувствительности RGB, приводящего к ближайшему возможному совпадению с функциями согласования цвета МКО.

Математическая процедура нахождения такого преобразования проще, чем может показаться на первый взгляд. Ниже эта процедура будет продемонстрирована для кривых чувствительности RGB типичного датчика цвета, доступного коммерчески (рис. 5). В этом примере будет использовано преобразование сигналов выхода RGB с использованием членов более высокого порядка:

$$\sqrt{R \times G}, \sqrt{G \times B}, \sqrt{R \times B}.$$

В этом случае конечное преобразование будет иметь вид:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} & M_{16} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{26} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} & M_{35} & M_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \\ \sqrt{RG} \\ \sqrt{GB} \\ \sqrt{RB} \end{bmatrix}$$

Можно оценить элементы матрицы преобразования  $M$  путем нахождения матрицы, которая преобразует кривые спектральной чувствительности датчика  $R(\lambda), G(\lambda), B(\lambda), \sqrt{R(\lambda)G(\lambda)}, \sqrt{G(\lambda)B(\lambda)}, \sqrt{R(\lambda)B(\lambda)}$  в функции согласования цвета МКО  $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda)$  и  $\bar{z}(\lambda)$ :

$$\begin{bmatrix} \bar{x}_{\lambda 1} & \bar{x}_{\lambda 2} & \dots & \bar{x}_{\lambda N} \\ \bar{y}_{\lambda 1} & \bar{y}_{\lambda 2} & \dots & \bar{y}_{\lambda N} \\ \bar{z}_{\lambda 1} & \bar{z}_{\lambda 2} & \dots & \bar{z}_{\lambda N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} & M_{16} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{26} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} & M_{35} & M_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{\lambda 1} & R_{\lambda 2} & \dots & R_{\lambda N} \\ G_{\lambda 1} & G_{\lambda 2} & \dots & G_{\lambda N} \\ B_{\lambda 1} & B_{\lambda 2} & \dots & B_{\lambda N} \\ \sqrt{RG}_{\lambda 1} & \sqrt{RG}_{\lambda 2} & \dots & \sqrt{RG}_{\lambda N} \\ \sqrt{GB}_{\lambda 1} & \sqrt{GB}_{\lambda 2} & \dots & \sqrt{GB}_{\lambda N} \\ \sqrt{RB}_{\lambda 1} & \sqrt{RB}_{\lambda 2} & \dots & \sqrt{RB}_{\lambda N} \end{bmatrix}$$

Первая матрица содержит  $3 \times N$  элементов, где  $N$  — общее количество значений длин волн, на которых заданы функции согласования цвета  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  и  $\bar{z}(\lambda)$ . Подобным образом в правой части уравнения содержится матрица  $N \times 3$  элементов, в которой каждая из кривых спектральной чувствительности также содержит по  $N$  элементов.

Чтобы найти матрицу преобразования, во-первых, обозначим каждую матрицу из уравнения выше  $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$ ,  $M$  и  $RGB$ , соответственно:

$$M \times RGB = \bar{x}\bar{y}\bar{z}.$$

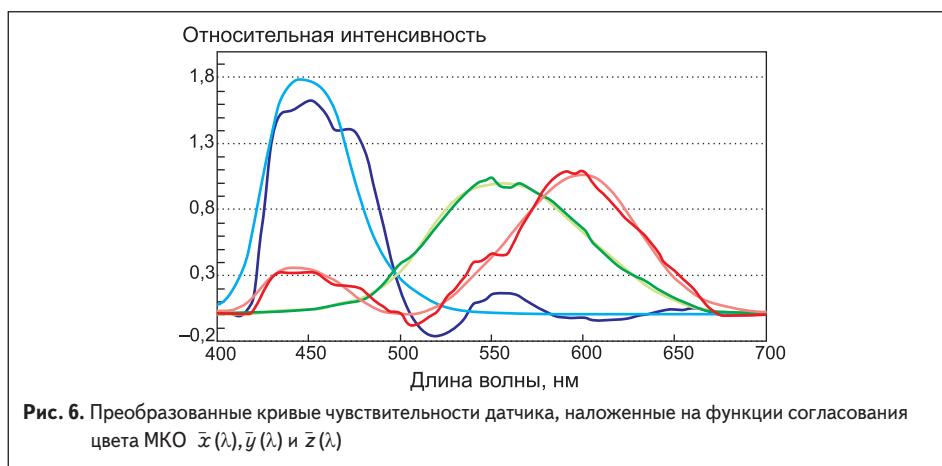
Умножив обе части на транспонированную матрицу  $RGB$ , получим:

$$M \times RGB \times RGB^T = \bar{x}\bar{y}\bar{z} \times RGB^T.$$

Умножив далее обе части на обратную матрицу произведения прямой и транспонированной матриц  $RGB$ , получим уравнение для  $M$ :

$$M = \bar{x}\bar{y}\bar{z} \times RGB^T \times (RGB \times RGB^T)^{-1}.$$

Использование  $M$  для преобразования кривых чувствительности датчика в функции согласования цвета МКО дает интересные результаты (рис. 6). В то время как совпадение далеко от совершенства, преобразованные кривые довольно хорошо соответствуют функциям согласования цвета. Итоговая ошибка в значениях тристимулов типичного СД с КЦТ 5000 К из примера составляет  $-0,005$  по координате  $x$  и  $-0,01$  по  $y$ .



Калиброванный датчик определения цвета является заключительным фрагментом головоломки. По заданной цветовой температуре могут быть вычислены координаты цветности  $x$  и  $y$  с последующим преобразованием в значения тристимулов. Текущие значения тристимулов трех СД могут быть измерены с помощью калиброванного датчика цвета, а относительная яркость каждого из них, требуемая для достижения целевых значений тристимулов, определяется соответствующей взвешенной суммой измеренных значений. Яркость каждого СД может быть установлена при помощи широтно-импульсной модуляции (ШИМ) или регулировкой протекающего через СД тока. Ввиду того что яркость СД имеет нелинейную зависимость от тока, ШИМ обычно предпочтительнее, хотя это имеет второ-

степенное значение, поскольку цветовой датчик обеспечивает непрерывную обратную связь для текущей яркости каждого СД, и это исключает любую ошибку, обусловленную изменением прямого тока при контроле яркости СД.

В то время как эти два подхода к смешению цветов увеличивают сложность и стоимость СД-продукта, при надлежащем применении эти усилия оправданы. Использование нескольких белых и цветных СД, совмещенных с обратной связью от датчиков определения цвета, открывает новые возможности для создания источников света с изменяемыми цветовыми характеристиками при одновременном улучшении точности воспроизведения цветов.

Оригинал статьи опубликован в <http://ledsmagazine.com/features/9/10/15>