

Простые рецепты белого света

Что такое белый свет, как собрать белый из простых спектральных составляющих и как от состава света зависит его качество.

Цветовое пространство CIE 1931

За цветовое зрение человека отвечают три типа колбочек, чувствительных к свету в широких и перекрывающихся, но все же различных спектральных областях. Это значит, что пространство ощущений цветового зрения трехмерно. Если одну размерность зарезервировать под интенсивность восприятия, то есть под видимую яркость, останутся две размерности. Следовательно, пространство различаемых человеком цветов двумерно.

Такое двумерное пространство различаемых некоторым условным усредненным человеком цветов тщательно изучено и представлено широкой публике в 1931 году в виде цветового пространства CIE 1931 (рис. 1). С тех пор Международная комиссия по освещению опубликовала множество улучшенных моделей, более адекватно описывающих цветовосприятие, но ни одна из них не получила

столь широкой известности. В большинстве нормативных документов, в том числе и в российских ГОСТах, даются ссылки на цветовое пространство CIE 1931.

В этой статье пространство CIE 1931 используется в качестве графического калькулятора, позволяющего наглядно предсказать результат смешения нескольких цветов.

Основные сведения о цветовом пространстве CIE 1931:

- Чистые цвета, состоящие из одной спектральной линии, расположены на границе цветового пространства. Составные цвета находятся внутри этих границ.
- Цвет теплового излучения при различных температурах (пламени свечи, нити лампы накаливания, поверхности Солнца и др.) располагается в цветовом пространстве вдоль кривой, называемой кривой излучения абсолютно черного тела (кривой АЧТ).

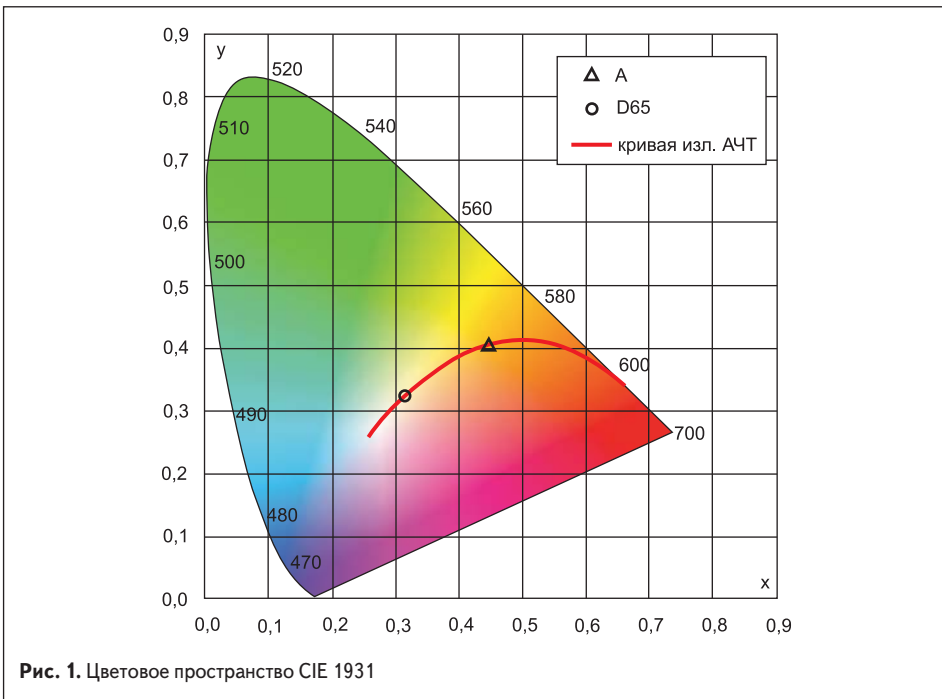


Рис. 1. Цветовое пространство CIE 1931

- Цвет света, с координатами на кривой АЧТ или недалеко от нее (рис. 2), принято считать белым. Различия, выражающиеся в разной пропорции теплых и холодных тонов, описывают параметром «цветовая температура» или «коррелированная цветовая температура». Чем больше доля синего цвета в белом, тем выше цветовая температура, чем выше доля желтого и красного — тем цветовая температура ниже. Так, белый дневной свет с большей долей синего имеет высокую цветовую температуру 6500 К и отражен на рис. 1 символом «о», а теплый свет лампы накаливания с большей долей желтого и красного имеет цветовую температуру 2700 К и отражен символом «Δ».
- Смешивая два цвета, мы всегда получаем сложный цвет с координатой на линии, соединяющей координаты исходных цветов. Меняя пропорцию исходных компонент, мы меняем координату составного света, перемещаясь вдоль этой линии. Например, падающий на лист бумаги солнечный свет и свет лампы накаливания образуют цветовую смесь на линии на рис. 1, соединяющей символы «Δ» и «о». Как видно, данная смесь также будет лежать вблизи кривой АЧТ и будет белым светом некоторой промежуточной цветовой температуры.
- В одну и ту же точку пространства CIE 1931 можно попасть различными способами. В статье представлено семь различных способов собрать белый свет цветовой температуры 4000 К, то есть попасть на середину кривой АЧТ. Состав смеси человеческое зрение различить не может. Наблюдаемый цвет света одинаков, если его цветовые координаты одинаковы.
- Цвет одной и той же поверхности, освещаемый светом с одной и той же цветовой координатой, но разным спектральным составом, может быть разным. Лепесток розы под белым дневным светом выглядит алым, а под традиционным белым светодиодным светом той же цветовой температуры скорее коричневым.

Цветопередача

Цвет любой поверхности — это цвет отраженного поверхностью света, определяемый составом

падающего на поверхность света и тем, какие его составляющие поверхность отразит. Всем известно, что цвет поверхности изменится, если освещать ее не белым, а цветным светом. Но цвет поверхности изменится, даже если ее осветить белым светом той же цветовой температуры (то есть имеющим те же координаты в цветовом пространстве), но с другим спектральным составом. До тех пор пока можно было выбирать между дневным светом, лампой накаливания и лучиной, это явление интересовало только художников, которые старались работать при дневном свете, работая на натуре или в остекленных студиях, напоминающих оранжевую.

Стремление художников использовать дневной свет легко понять: цветовое зрение человека — важнейший инструмент выживания. Ведь он предназначен для того, чтобы, скажем, отличить съедобный кусок мяса от несвежего или симпатизировать человеку с лицом естественного цвета. А так как нам памяты «правильные» цвета под дневным светом, изменение освещения и изменение цветов сделает еду неаппетитной, а вид лица нездоровым.

С появлением люминесцентных источников света возникла задача сравнивать белый свет разных ламп, имеющих одну цветовую температуру, но разный спектральный состав. В общем случае, разумеется, лучшим выбором будет источник, цвета под которым выглядят так же, как под дневным светом.

В 1964 году МКО опубликовала методику оценки качества спектрального состава света Color Rendering Index (CRI) [1]. CRI — это набор из 8 (а с 1974 г. из 14) частных индексов R_i и общего индекса R_a , равного среднему

арифметическому первых восьми частных индексов. Каждый частный индекс характеризует разницу цвета соответствующего эталонного образца под оцениваемым светом и под дневным светом такой же цветовой температуры. В этом смысл термина «цветопередача»: чем точнее цвет образца под данным светом совпадает с его же цветом при естественном освещении, тем цветопередача лучше.

Максимальное значение общего индекса цветопередачи $R_a = 100$. Чем оно выше и ближе к 100, тем больше данный свет пригоден для задач, связанных с цветоразличением и цветоузнаванием. Иногда, чтобы не объяснять потребителю, что такое R_a , в технической документации это единственное значение называют CRI.

С 1964 года МКО провела значительную работу, построив более точные модели цветового зрения человека и предложив несколько альтернативных систем индексов, оценивающих качество света и точность цветопередачи [2]. Но официального представления новой методики для широкого применения взамен CRI еще не было.

Что такое белый свет

Белым светом считается такой, цветовые координаты которого лежат на кривой АЧТ или недалеко от нее (рис. 2). Собрать белый свет можно, сложив минимум два чистых цвета так, чтобы результат цветосмешения попал на нужную точку кривой АЧТ или в ее окрестности. Причем значительный промах влево-вправо по кривой АЧТ не сильно влияет на видимый глазом цвет, тогда как даже небольшое от-

клонение в сторону от кривой АЧТ придает цвету заметный оттенок. Янтарно-зеленый при отклонении вверх и малиновый при отклонении вниз.

По личному мнению автора, столь широкий диапазон вариантов белого цвета, указанный в стандартах ГОСТ 54350-2011 и ANSI C78.377, не упрощает работы производителям и не приносит пользы потребителям.

Да, цветность естественного освещения в течение дня меняется очень сильно и может выходить даже за указанные в стандартах пределы. Но дневной свет имеет богатый спектральный состав, и наблюдаемые человеком сцены остаются полноцветными. К тому же освещенности, создаваемые естественным светом, настолько велики, что зрение успешно адаптируется к каждому значению цветовой температуры — любой дневной свет нам кажется белым. Скучное же искусственное освещение с температурой ниже 4000 К на практике имеет желтый оттенок, а с температурой выше 4000 К — синий.

Для специальных задач, таких как имитация света лампы накаливания или коррекция циркадного ритма, можно применять низкие и высокие цветовые температуры, но если речь идет об общем освещении, целесообразно использовать нейтральный белый без цветных оттенков. А отсутствие рекомендации использовать нейтральный белый и технологически обусловленное небольшое преимущество в эффективности источников высокой цветовой температуры вынуждает производителей навязывать потребителям холодный синюшный свет.

Итак, будем считать белым свет, лежащий строго на кривой АЧТ и имеющий цветовую температуру 4000 К.

Из чего можно собрать белый свет

На сегодня светодиодные технологии располагают следующими спектральными составляющими:

- Излучение цветных светодиодов: сравнительно узкие пики шириной ~20 нм с максимумом от 450 нм до ИК. В технической документации на светодиоды обычно приведено несколько типичных вариантов, но, заказывая цветные бины с нужным сдвигом относительно среднего значения, можно подобрать почти любую длину волны из видимого диапазона. Наиболее трудно, но при некоторой настойчивости можно, приобрести светодиоды очень красивого сине-зеленого цвета 480–490 нм (он же Cyan, он же Verde, он же Bluish Green).
- Излучение цветного люминофора, освещаемого синим светом длиной 450 нм, — это пики шириной ~70 нм с максимумом 500–530 нм и пики с несколько большей шириной, ~100 нм с максимумом от 530 нм до ИК.
- Также можно использовать ультрафиолетовый светодиод и, освещая ультрафиолетом люминофоры, получить широкие люминофорные пики в диапазоне 450–500 нм. Но поскольку ультрафиолетовая составляющая представляет

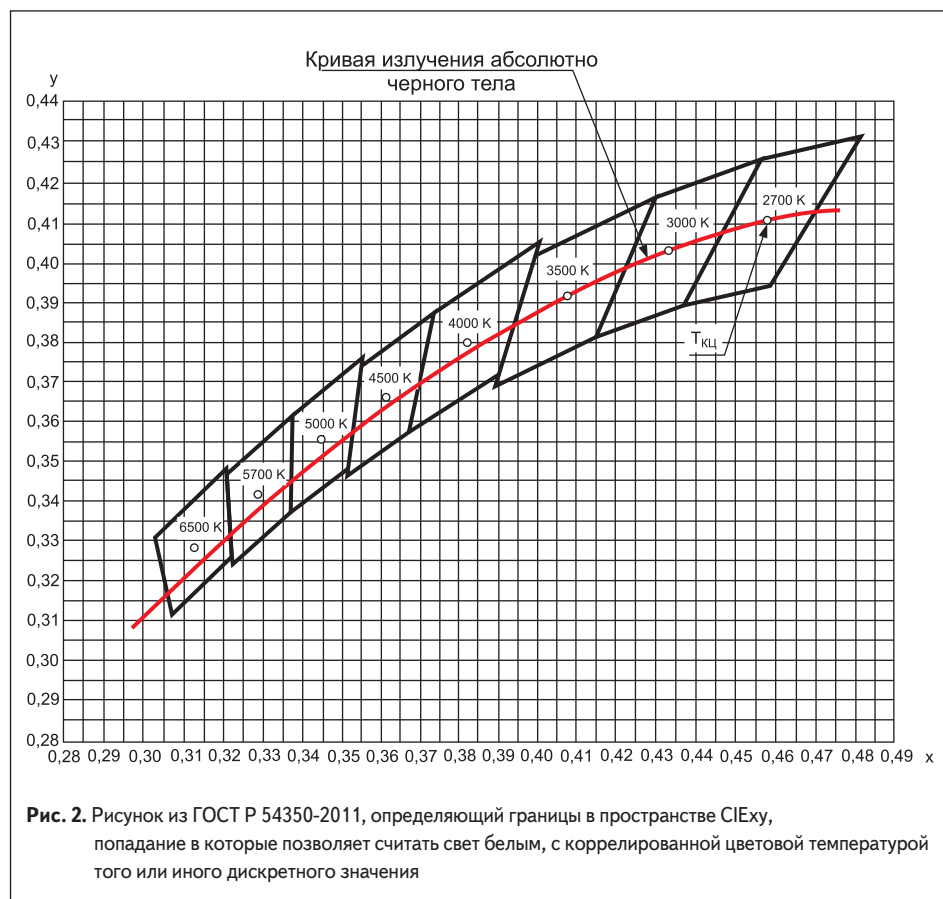
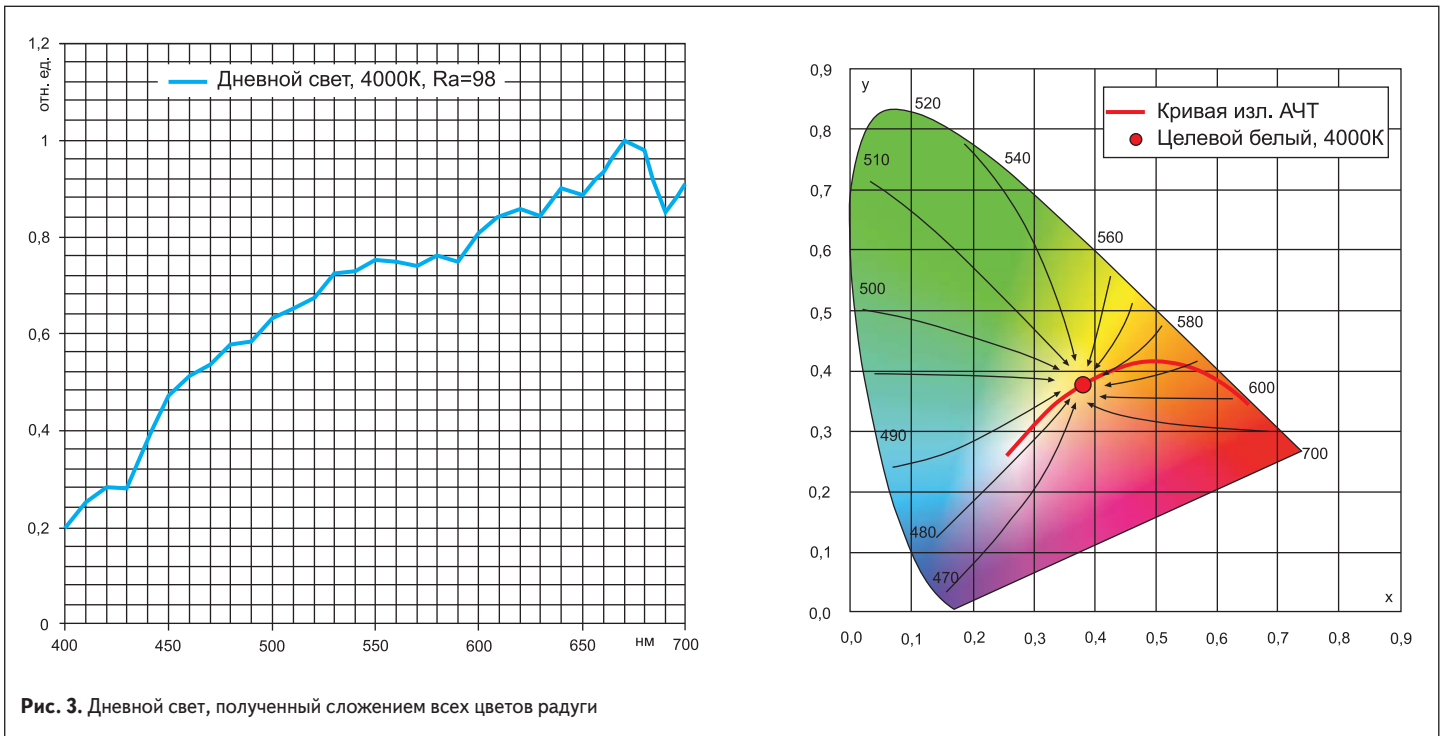


Рис. 2. Рисунок из ГОСТ Р 54350-2011, определяющий границы в пространстве CIExy, попадание в которые позволяет считать свет белым, с коррелированной цветовой температурой того или иного дискретного значения



опасность для зрения, такую возможность даже в расчетах учитывать не будем.

Все эти цветовые составляющие можно собрать в одной лампе и получить белый свет. При этом использование цветных светодиодов разных типов в одном светильнике затруднено, так как возникает проблема со стабильностью баланса одних цветовых составляющих относительно других. Применение же глубокого синего 450 нм и люминофоров в любых пропорциях не приводит к проблемам с цветовым балансом — ведь люминофоры, особенно нанесенные хотя бы на некотором отдалении от горячего кристалла, излучают очень стабильно.

Основные рецепты белого света

Смесь всех цветов радуги

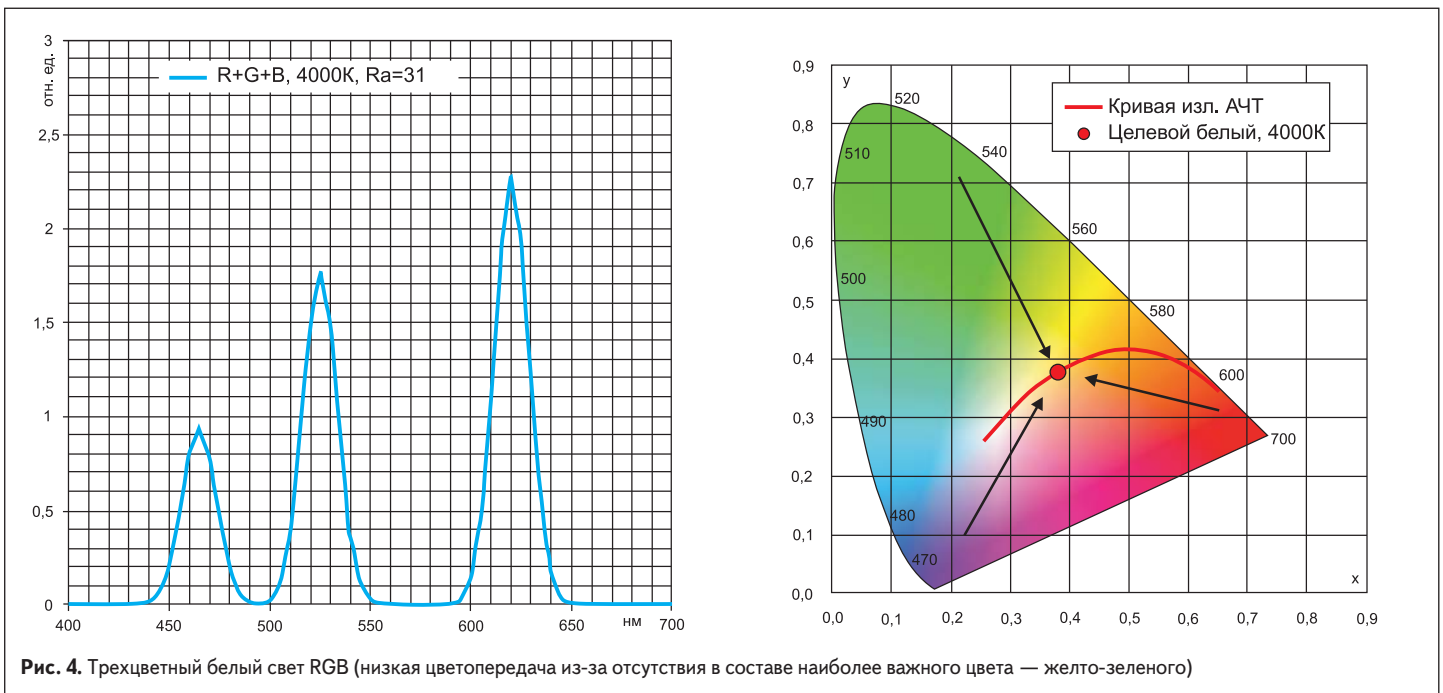
Дневной свет имеет сплошной спектр и состоит из всех цветов радуги (рис. 3). Индекс цветопередачи $Ra = 98$. То, что Ra оказался менее 100 единиц, обусловлено недостатком методики расчета индексов цветопередачи, предписывающей при цветовых температурах менее 5000 К за эталонный источник света брать не дневной свет, а цвет абсолютно черного тела той же цветовой температуры. Естественно, дневной свет немного отличается от света АЧТ, и индексы цветопередачи оказываются несколько ниже абсолютного

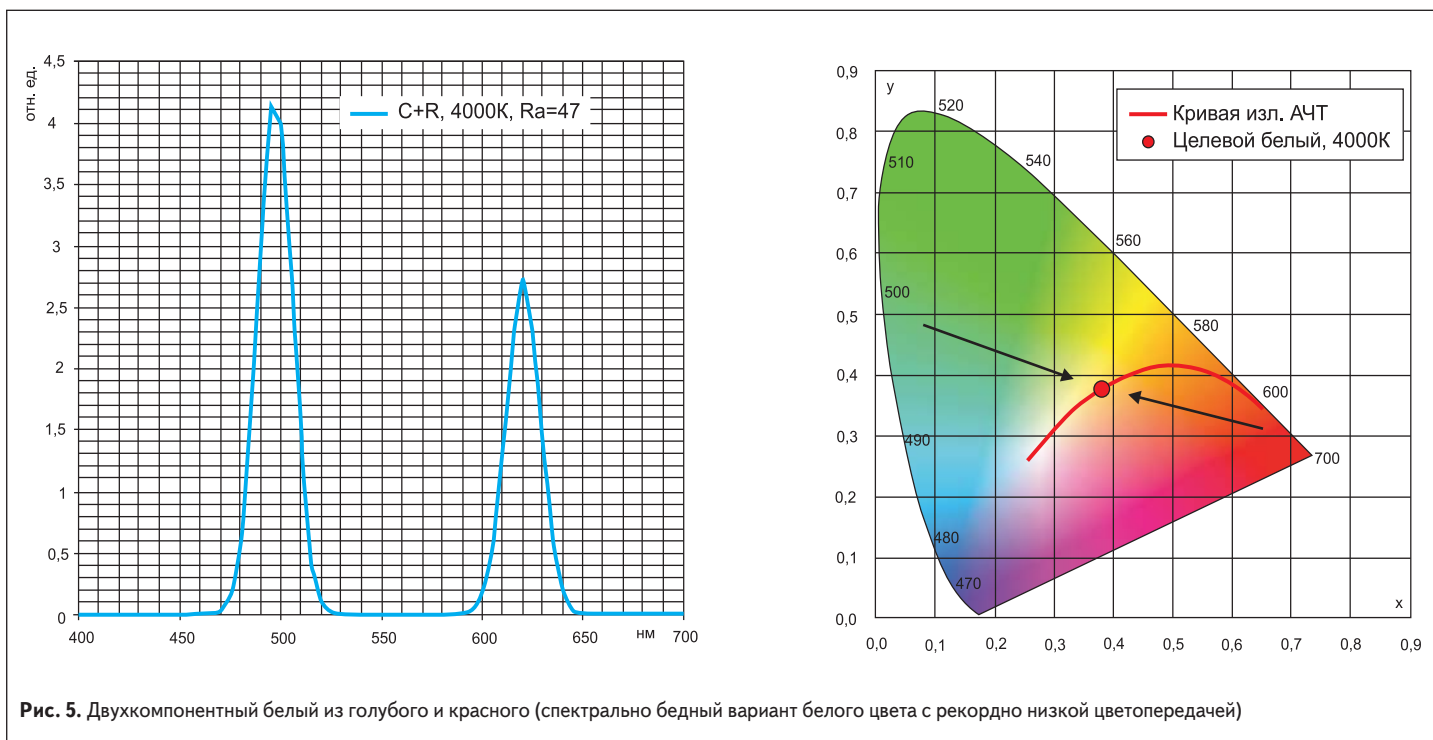
максимума. Этот пример также показывает, что нет смысла бороться за каждый пункт общего индекса цветопередачи и целесообразно ориентироваться только на его примерное значение.

RGB — три чистых цвета: красный, зеленый и синий

RGB — три пика шириной 20 нм, для примера с максимумами на 465, 525 и 620 нм. Общий индекс цветопередачи $Ra = 31$.

RGB-белый относительно равномерно заполняет видимый спектр, но имеет неожиданно низкую цветопередачу (рис. 4). Такой свет наблюдатели описывают как «серый»





или «грязный». Это происходит оттого, что в его составе нет важной желто-зеленой составляющей. Чувствительность зрения к желто-зеленому максимальна. Отсутствие данной компоненты приводит к очень большим искажениям наблюдаемых цветов и низкому Ra .

Два чистых цвета: голубой и красный

Известно, что белый можно сложить как из семи (рис. 1), так и из трех цветов (рис. 4). Но не все знают, что белый можно сложить из двух цветов. Но не из произвольных, а лежащих по разные стороны кривой излучения АЧТ.

Например, из голубого 497 и красного 620 нм (рис. 5). Этот спектрально бедный вариант белого цвета может похвастаться рекордно низким $Ra = -47$.

Ради любопытства автор собрал лампочку из голубых и красных светодиодов, сбалансировал токи, чтобы получился белый, и попробовал под таким светом жить и работать. Ощущения неприятные, через несколько дней эксперимент был прекращен.

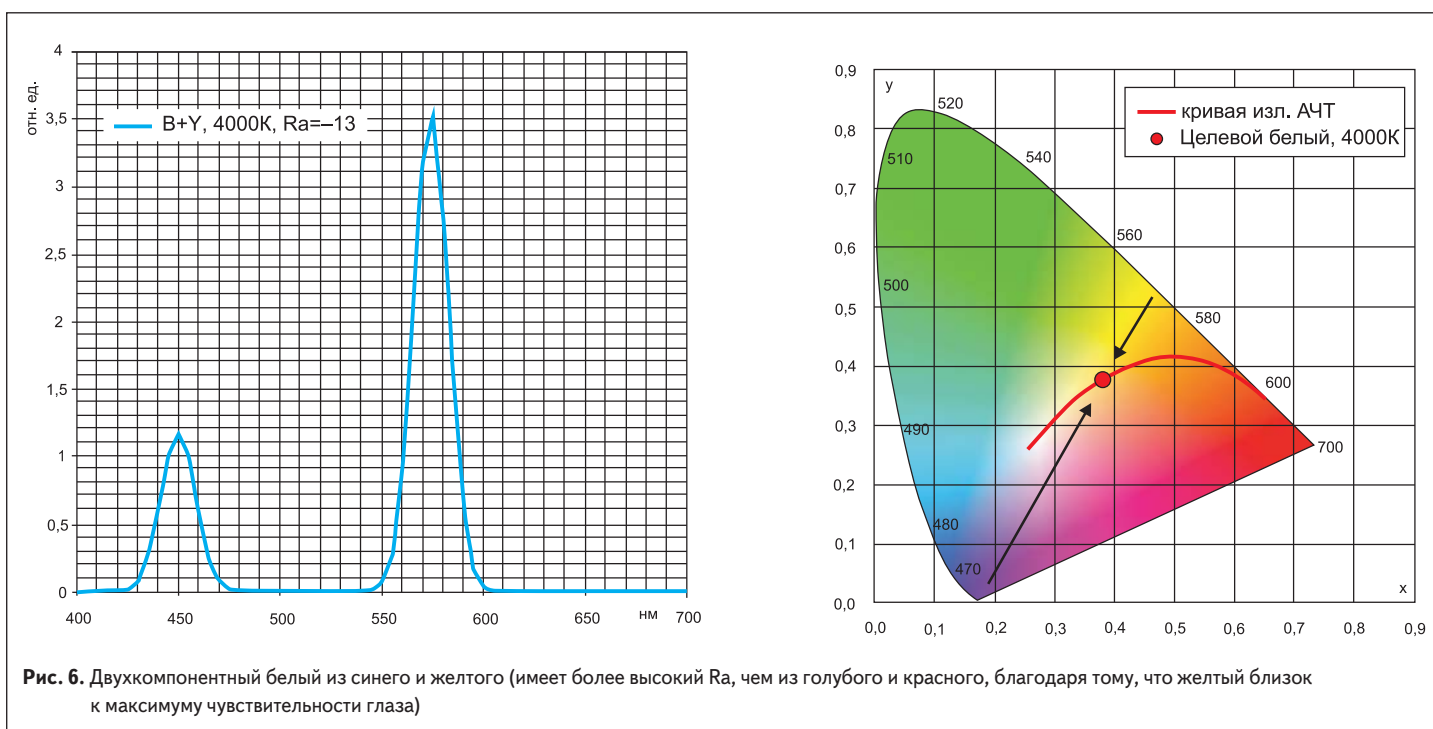
Два чистых цвета: синий и желтый

Собрать белый из двух цветов можно двумя способами: смешать голубой с красным или синий

с желтым. Синий с желтым, для примера 450 и 577 нм (рис. 6), гораздо интереснее, поскольку желтый близок к максимуму чувствительности. И такой белый имеет уже гораздо лучший, хотя и все равно очень низкий $Ra = -13$.

Классический рецепт белого светодиодного света: синий и широкий желтый

Все предыдущие варианты предполагали систему поддержания баланса токов через цветные диоды. Люминофор же, активируемый синим светом, излучает очень стабильно и пропорционально интенсивности возбуждающего



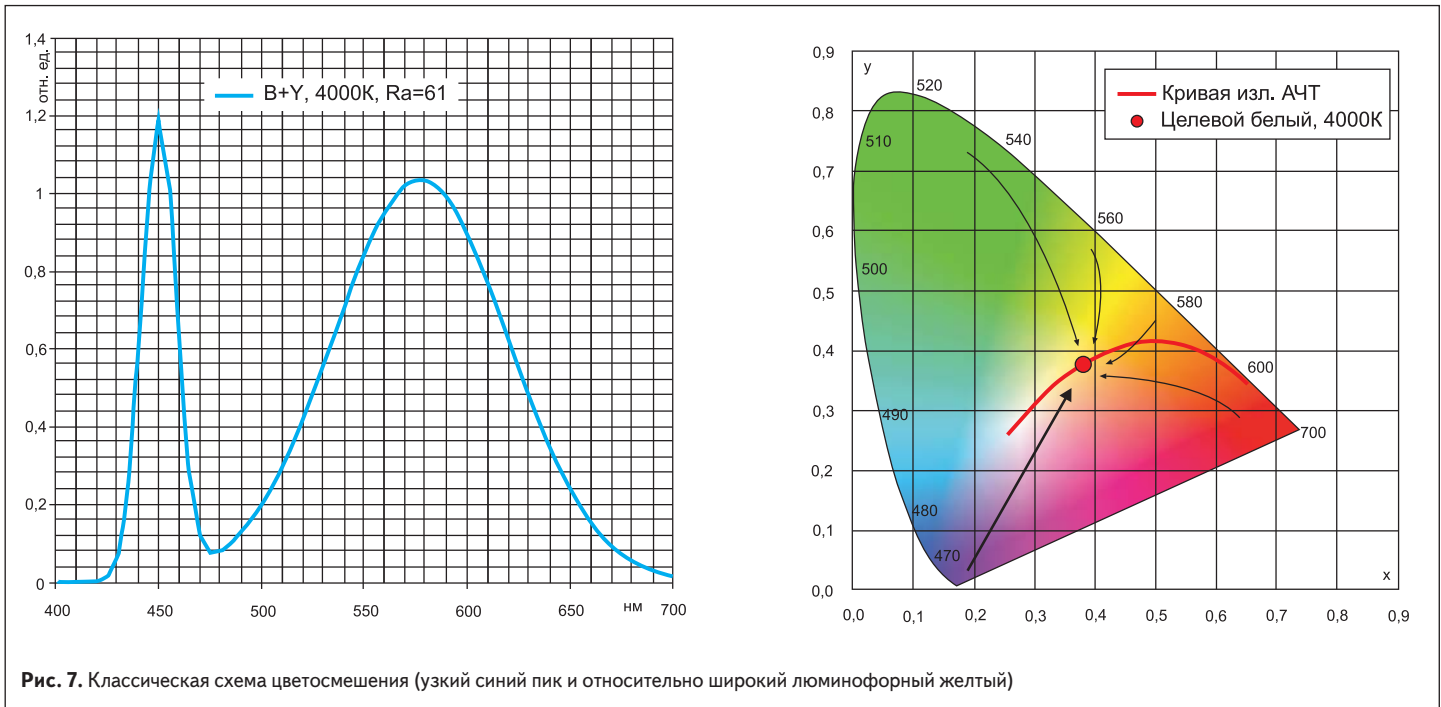


Рис. 7. Классическая схема цветосмещения (узкий синий пик и относительно широкий люминофорный желтый)

синего света. Поэтому капля желтого люминофора тщательно подобранной концентрации на синем кристалле дает стабильный белый свет, который в будущем не потребует балансировать. Когда уменьшится интенсивность свечения синего кристалла, пропорционально снизится и интенсивность свечения

люминофора, а цветовой баланс сохранится и цветовая смесь останется белой. Это и есть традиционный рецепт белого светодиодного света (рис. 7).

По сравнению с предыдущим вариантом благодаря расширению желтого пика и добавлению в смесь желто-зеленого и красного индекс

цветопередачи значительно выше: $Ra = 61$. Это уже «умеренно-плохой» белый, который на заре развития светодиодной светотехники продавали как стандарт.

Тенденцией последних лет является использование более сложных люминофоров и расширение желтого пика, что позволяет улучшить цветопередачу светодиодов, собранных по такой схеме, до $Ra > 70$ и даже до $Ra > 80$. Чтобы понять, насколько эта схема все еще далека от идеала, достаточно попробовать представить женское лицо с голубыми глазами и красными губами под белым светодиодным светом, в котором нет голубой и красной составляющих.

В разговоре о двухцветных светодиодах нельзя не отметить технологию Osram EQ white, заключающуюся в том, что совместно с синим кристаллом используется повышенное количество желто-зеленого люминофора. В результате координаты цветовой смеси уходят с кривой АЧТ и получается не белый, а зеленовато-белый свет с приемлемой цветопередачей $Ra = 65$ и очень высокой эффективностью за счет повышенной доли желто-зеленой составляющей (рис. 8).

Классика плюс узкий красный

Если избыточная концентрация желто-зеленого люминофора уводит координаты цветовой смеси с кривой АЧТ, то добавление красного цвета возвращает смесь на кривую АЧТ. Снова получается белый свет, но уже с гораздо более высокой цветопередачей. Высокой цветопередача становится не только за счет того, что в спектре появляется красный, но и благодаря тому, что использование красного позволяет заменить желтую составляющую на более важную желто-зеленую. Для примера: смесь из узкого синего 450 нм, широкого желто-зеленого 544 нм и узкого красного 620 нм имеет общий индекс цветопередачи $Ra = 93$ (рис. 9).

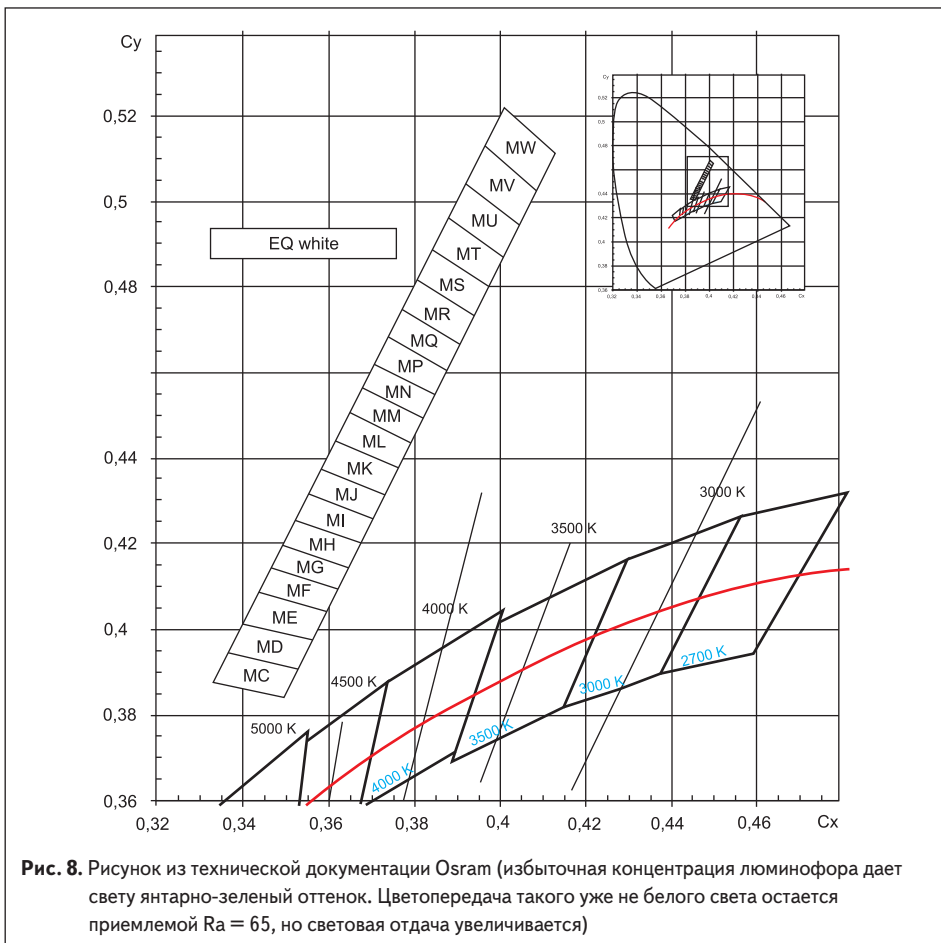


Рис. 8. Рисунок из технической документации Osram (избыточная концентрация люминофора дает свету янтарно-зеленый оттенок. Цветопередача такого уже не белого света остается приемлемой $Ra = 65$, но световая отдача увеличивается)

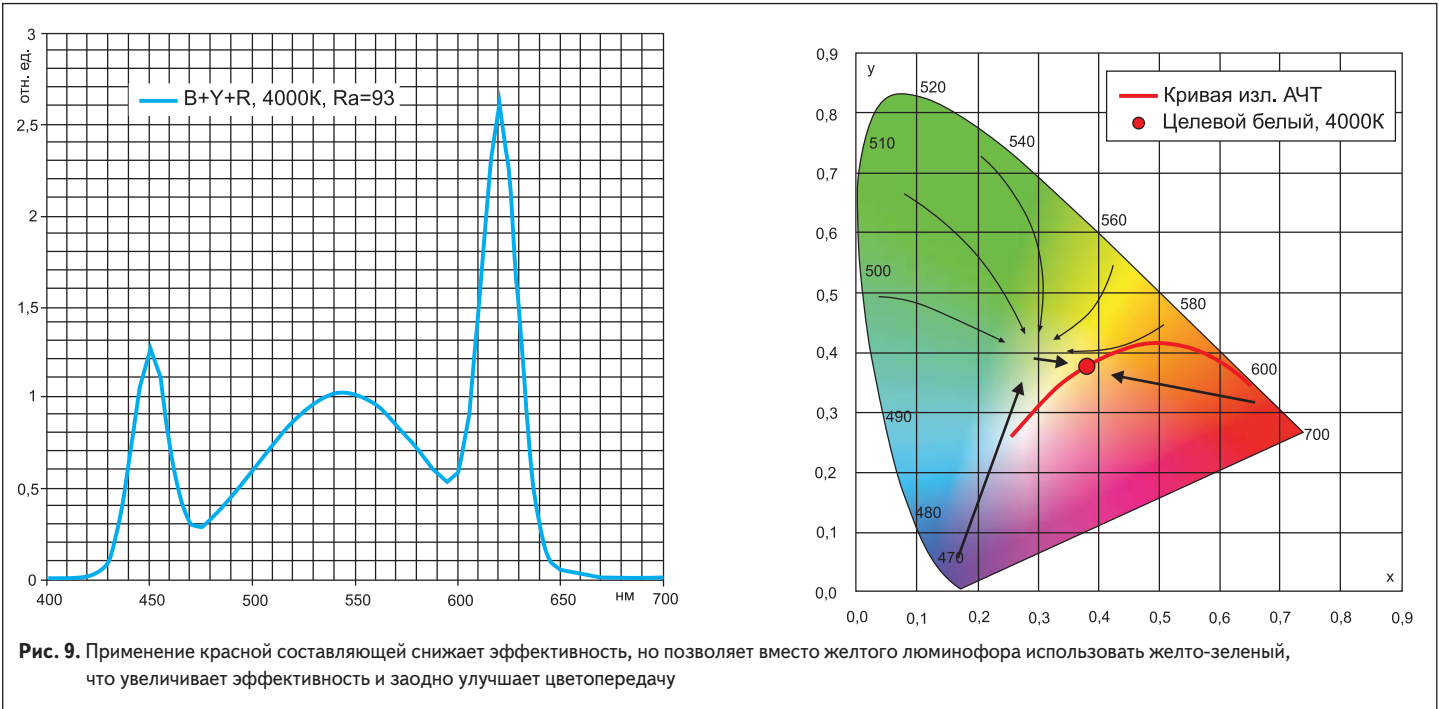


Рис. 9. Применение красной составляющей снижает эффективность, но позволяет вместо желтого люминофора использовать желто-зеленый, что увеличивает эффективность и заодно улучшает цветопередачу

Эта технология запатентована под названием Cree TrueWhite, а при замене красного на оранжевый — Osram Brilliant Mix. И хотя светильники, построенные по такой технологии, давно можно купить в магазине, ее будущее туманно. Проблема в том, что применение не одного, а двух типов светодиодов в одном светильнике требует схемы баланса токов для возвращения уплывающих координат цветовой смеси на кривую АЧТ.

Классика плюс широкий красный

Применение красного люминофора предпочтительней использования красных светодиодов по причине высокой стабильности излучения люминофора. Как и желтый

и желто-зеленый люминофоры, красный излучает пропорционально падающему на него синему потоку, и если координаты цветовой смеси на кривую АЧТ попали, далеко они уже не уплывут. Несомненным преимуществом, положительно влияющим на цветопередачу, является большая ширина люминофорного красного и более широкое покрытие видимого диапазона. Для примера: смесь из узкого синего 450 нм, широкого желто-зеленого 525 нм и широкого красного 630 нм имеет общий индекс цветопередачи $Ra = 98$ (рис. 10).

Большого и желать было бы нельзя, если не вспомнить о том, что остается небольшой провал в голубом диапазоне, и пока на свете есть

девушки с голубыми глазами, светодиодным технологиям есть куда развиваться.

Автор выражает благодарность за совместную работу над темой д. х. н., профессору Анатолию Васильевичу Вишнякову.

Литература

1. Шаракшанэ А. Шкалы оценки качества спектрального состава света — CRI и CQS // Полупроводниковая светотехника. 2011. № 6.
2. Wendy Davis, Yoshi Ohno. Color quality scale // Opt. Eng. 49, 033602 (2010).

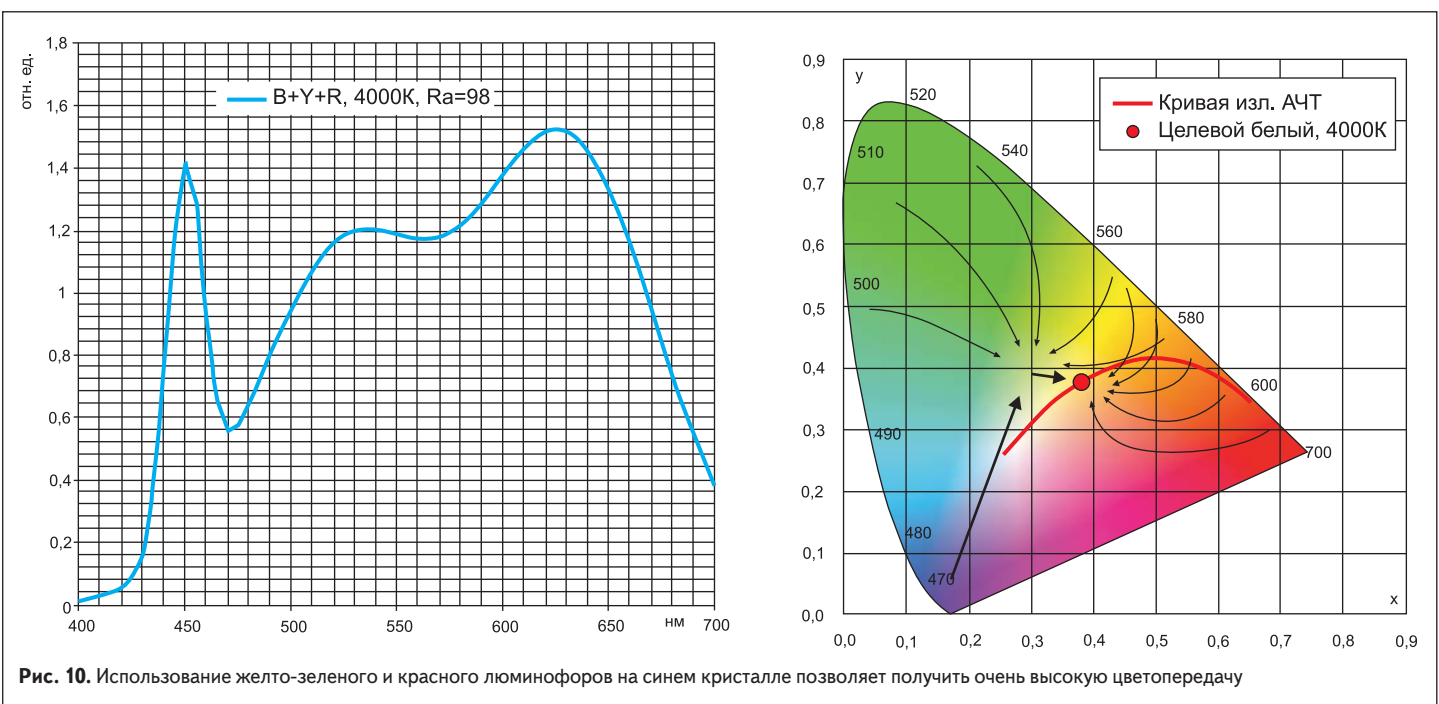


Рис. 10. Использование желто-зеленого и красного люминофоров на синем кристалле позволяет получить очень высокую цветопередачу