

Сергей Никифоров, к. т. н. | snikiforov@list-lab.ru

Реальный цвет и виртуальный индекс его передачи

В статье предлагается рассмотреть связь одного из качественных показателей белого света — индекса цветопередачи — с восприятием излучения светодиодов глазами с точки зрения физики работы оптической системы и фотометрической структуры глазного аппарата. Проведено сравнение с восприятием излучения от других источников, уже вошедших в классические виды освещения и используемых в системах освещения и световой сигнализации. Такой подход к сравнению будет объективен и выявит максимум сторон оправданности использования индекса цветопередачи как показателя «качества» белого света в рамках применения полупроводниковых источников излучения в освещении.

Что мы видим: цвет или его индекс?

Индекс цветопередачи R_a (коэффициент цветопередачи) — параметр, характеризующий уровень соответствия естественного цвета тела видимому (кажущемуся) цвету этого тела при освещении его данным источником света. Указанное соответствие всегда проверяется при освещении тела опорным источником с известными характеристиками цветности, а исследуемый источник должен обладать максимальным сходством с опорным по колориметрическим характеристикам. Выбор стандартного источника, с которым сравнивается опытный, также представляет проблему. При таком выборе следует руководствоваться всем тем, что понимается под первоначальным восприятием цвета предмета. Другими словами, это воспринимаемый цвет предмета при том освещении, при котором обычно видят этот предмет. В большинстве случаев им будет свет лампы накаливания или некоторая фаза дневного света. Спектральный состав света лампы накаливания, которая может иметь цветовую температуру вплоть до 3400 К, адекватно определяется планковским распределением. Спектральный состав различных фаз естественного дневного света определяется в диапазоне 4000 К и выше. Из ряда излучений ламп накаливания и дневного света можно выбрать стандартное излучение, по отношению к которому будут проверяться цветопередающие свойства исследуемого источника.

Для удобства на практике среди имеющихся стандартных излучений выбирается излучение, коррелированная цветовая температура которого максимально соответствует цветовой температуре исследуемого источника. Такой выбор полностью или, по крайней мере, почти полностью исключает необходи-

мость учета изменения состояния адаптации глаза, о которой будет сказано далее. Таких изменений не будет, если как стандартный, так и исследуемый источники имеют один и тот же цвет, то есть образуют метамерное цветовое равенство.

Степень соответствия воспринимаемых цветов предметов, освещаемых исследуемым и стандартным источниками, удобно оценивать в равноконтрастном цветовом пространстве. Различия в цветности обычно считаются наиболее важными, и поэтому использования равноконтрастного цветового графика Международной комиссии по освещению (МКО) 1960 г. достаточно для приблизительного определения таких различий. Метод МКО [1] очень хорошо согласуется с отмеченными выше требованиями. Он является в основном методом сдвига цвета, так как с его помощью рассчитываются средние колориметрические сдвиги на равноконтрастном цветовом графике МКО 1960 г. для ряда исследуемых предметов по отношению к исследуемому и стандартному источникам излучения той же цветности.

Общий индекс цветопередачи R_a , рекомендованный МКО [1], определяется как

$$R_a = 100 - 4,6\Delta E_a, \quad (1)$$

где ΔE_a представляет среднее арифметическое восьми значений ΔE_{ai} (2) для восьми исследуемых цветов.

$$\Delta E_{ai} = 800 \{ [(u_{oi} - u_o) - (u_{ki} - u_k)]^2 + [(U_{oi} - U_o) - (U_{ki} - U_k)]^2 \}^{1/2}, \quad (2)$$

где u, U — координаты равноконтрастного цветового графика МКО 1960 г.

В частности: u_k, U_k — координаты цветности i -го образца относительно исследуемого излучения k ; u_o, U_o — координаты цветности i -го образца относительно стандартного излучения o ;

u_k, U_k — координаты цветности испытуемого излучения k ;

u_o, U_o — координаты цветности стандартного образца o .

Все эти рассуждения приведены для понимания смысла коэффициента цветопередачи, рекомендованного МКО, а также для раскрытия его сути, существенно «оторванной» от реальностей физики работы источников света и их «потребителей» — глаз. Можно заметить, что нуждающийся в оценке истинный цвет источника сравнивается с исключительно расчетными колориметрическими параметрами опорного источника, да и сам коэффициент R_a — сугубо расчетный параметр, плод воображения, а не физическая величина.

С появлением источников света со сложным спектральным распределением светового потока (люминесцентные лампы, светодиоды, натриевые и металлогалогенные лампы и др.) индекс цветопередачи этих источников стало еще более трудно понимать: в сравнении с планковскими источниками излучения никак не получается приравнять их физическую часть колориметрических характеристик в виде спектрального состава излучения, кроме расчетных — координат цветности, также имеющих сомнительную репутацию оценки цвета. Таким образом, освещенность, равнозначно воспринимаемая глазным аппаратом от источников с различным спектральным составом, будет иметь разные значения, несмотря на то, что упомянутые расчетные параметры (R_a , координаты цветности) могут находиться очень близко. Потому как корректно сравнить эти источники с лампой накаливания или стандартными источниками будет затруднительно. Вероятно, для этого необходимо разобраться в физических аспектах работы глазного аппарата, а также в специфическом воздействии на него различных источников света, применяемых в современном освещении.

Природа установила свои светотехнические и колориметрические законы на несколько миллионов лет раньше, чем это сделала МКО

Глаз человека представляет собой непревзойденный по характеристикам фотометрический прибор, способный различать даже небольшие оттенки цветов в диапазоне яркости наблю-

даемого объекта. Данный диапазон лежит в пределах десяти порядков величины [11].

Принято считать, что при яркости фона 10^{-6} кд/м² (практической темноте) пороговый блеск для центрального зрения равен 2×10^{-8} лк, а для периферического — 2×10^{-9} лк. Стоит обратить внимание на то, что для наблюдения очень слабых источников света необходимо, чтобы их изображение на сетчатке получалось не в ее центре, а на периферии, где чувствительность выше. Специальное исследование этого вопроса установило, что максимум световой чувствительности адаптированного к темноте глаза приходится на десятый градус периферии. Эта зона сетчатки соответствует максимальной чувствительности колбочек и плотности палочек.

Увеличение размера светового пятна вызывает неполное суммирование энергии. С дальнейшим увеличением размера пятна суммирование может полностью отсутствовать. Математически это может выглядеть так:

$$L\gamma^n = \text{const}, \quad (3)$$

где L — освещенность; γ — размер объекта; при малом размере объекта (меньше $50'$) $\gamma = 2$.

Показатель степени n выражает способность глаза суммировать по площади световое воздействие внутри углового размера пятна γ . Несмотря на такую зависимость, значительное расширение площади апертуры самосветящегося объекта при условии применения светодиодов относительно, например, лампы накаливания приводит к существенному увеличению вероятности верного распознавания цвета при прочих равных условиях [2, 3]. Вероятно, здесь в сумме эффектов может сказываться и квазимохроматическое свойство излучения светодиодов. Абсолютный световой порог зависит также и от длительности предъявления объекта, то есть от времени экспозиции.

Все упомянутые характеристики восприятия являются параметрами адаптации зрительного аппарата глаза. Глаз обладает чрезвычайно важ-

ной биологической способностью приспособляться — адаптироваться к различным режимам работы. Благодаря этому свойству зрительная система работает в широком диапазоне яркостей: 10^{-6} – 10^5 кд/м². При изменении уровня яркости поля зрения автоматически включается целый ряд механизмов, которые и обеспечивают перестройку зрения. Адаптацию следует рассматривать как развитие во времени процесса перехода от одного уровня яркости к другому.

Если уровень яркости длительное время не изменяется, то состояние адаптации приходит в соответствие с этим уровнем. В таких случаях говорят уже не о процессе адаптации, а о состоянии адаптации к данному уровню яркости. При резком изменении яркости происходит разрыв между яркостью и состоянием зрительной системы. Он и служит сигналом для включения адаптационных механизмов.

Перепад яркостей объектов, с которыми работает глаз, очень велик — 10^{11} раз. Различают две разновидности адаптации:

1. темновую адаптацию, возникающую при уменьшении яркости фона от некоторого значения L_{np} , называемой яркостью пред-адаптации, до значительно более низкого уровня яркости (в пределе до 10^{-6} кд/м², то есть практической темноты);
2. световую адаптацию, возникающую при увеличении яркости от малого ее значения (10^{-6} кд/м²) до некоторого высокого уровня L_a .

Уменьшение пороговой яркости при темновой адаптации объясняется несколькими причинами:

- переходом от колбочкового зрения к палочковому;
- расширением зрачка;
- увеличением площадки, по которой происходит суммирование воздействия света на сетчатку;
- увеличением времени суммирования световых воздействий;
- увеличением концентрации светочувствительных веществ в зрительных рецепторах;
- увеличением чувствительности мозговых центров зрения.

Однако при решении задач с помощью светофоров или светотехнических устройств, где основной функцией является цветовое различие (табло, экраны, подсветка), возникает необходимость не только заметить источник света, но и правильно опознать его цвет [4, 5]. Это возможно лишь в том случае, если блеск источника выше порога цветовосприятия, то есть хроматического порогового блеска E_c . Зависимость $E_c = f(\lambda)$ при наблюдении на темном фоне приведена на рис. 1. На рисунке видно, что кривая имеет два максимума в синей и желто-зеленой областях. Хроматический порог, так же как и ахроматический, зависит от яркости фона. Зависимость $E_c = f(L)$ представлена на рис. 2. При любом значении яркости фона величина хроматических порогов выше, чем ахроматических.

Однако поскольку цвет — величина трехмерная, то и различия в цвете могут быть трех родов: по яркости L , по цветовому тону λ и по чистоте (насыщенности) цвета P . Различие по яркости определяется контрастом K , а пороговое различие по яркости — пороговым контрастом K_p . Пороговые различия по цветовому тону обозначаются как $\Delta_n\lambda$, а по чистоте — Δ_nP .

Чувствительность глаза к различению цветового тона неодинакова в разных областях [4, 11] спектра. В таблице 1 указаны границы спектральных участков, интервал каждого участка $\Delta\lambda$, значение порогов $\Delta_n\lambda$ в данном интервале, число порогов $n\Delta$ в каждом интервале и число порогов n от крайней границы спектра до данного интервала. Значение $n = 129,6$ показывает, что во всем интервале видимого спектра мы можем различать около 130 градаций цветового тона. Итак, можно принять $n = 130$. На рис. 3 показана зависимость порогов цветоразличения $\Delta_n\lambda$ глаза от длины волны излучения.

Чувствительность глаза к изменению чистоты цвета обычно характеризуют не порогом ΔP , а числом n_p , показывающим, сколько цветов от чисто белого до спектрально чистого способен различать глаз при данном цветовом тоне λ .

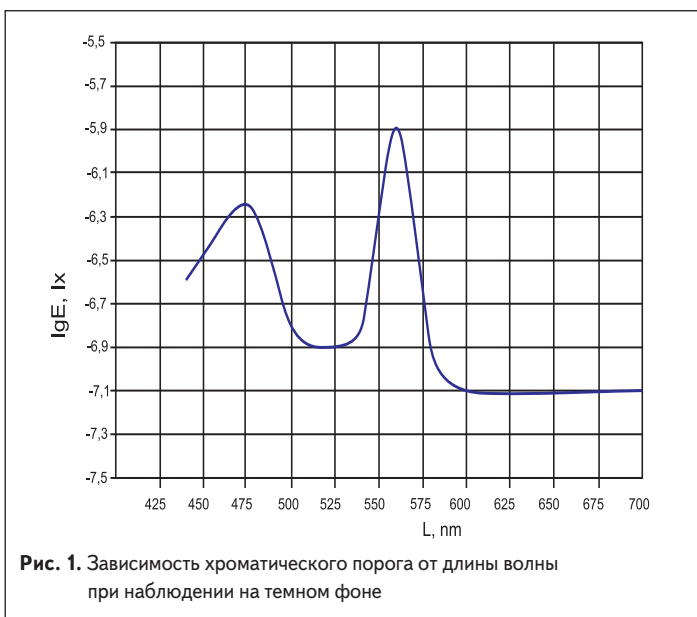


Рис. 1. Зависимость хроматического порога от длины волны при наблюдении на темном фоне

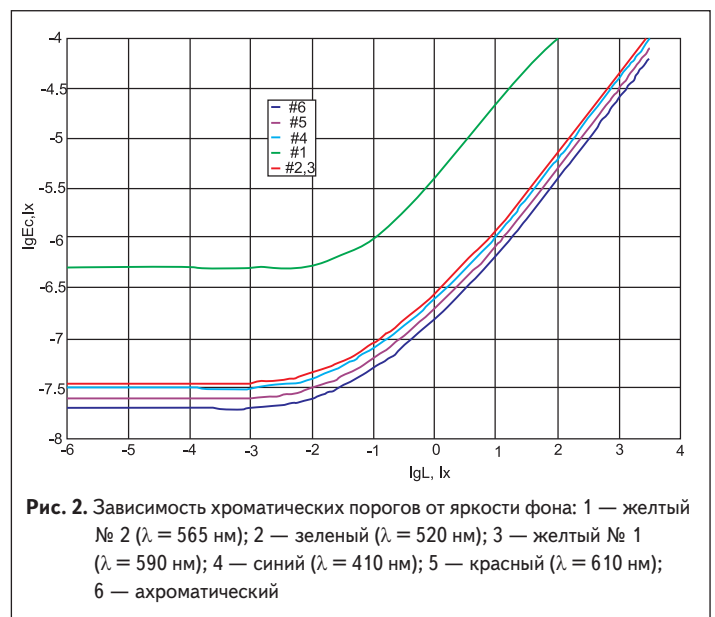


Рис. 2. Зависимость хроматических порогов от яркости фона: 1 — желтый № 2 ($\lambda = 565$ нм); 2 — зеленый ($\lambda = 520$ нм); 3 — желтый № 1 ($\lambda = 590$ нм); 4 — синий ($\lambda = 410$ нм); 5 — красный ($\lambda = 610$ нм); 6 — ахроматический

Таблица 1. Зависимость числа порогов цветоразличения от спектрального диапазона длин волн

Границы спектральных участков, нм	$\Delta\lambda$, нм	$\Delta_n\lambda$, нм	n_λ	n
760–700	—	—	1,0	1,0
700–678	22,0	22,0	1,0	2,0
678–665	13,0	13,0	1,0	3,0
665–659	6,0	6,0	1,0	4,0
659,0–649,5	9,0	5,17	1,8	5,8
649,5–620,0	29,5	3,09	9,6	15,4
620,0–595,9	24,1	2,08	11,6	17,0
595,9–575,2	20,7	1,23	17,0	44,0
575,2–549,1	26,1	2,04	12,8	56,8
549,1–521,4	27,7	3,04	9,0	65,8
521,4–505,4	16,0	2,0	8,0	73,8
505,4–483,2	22,2	1,25	17,8	91,6
483,2–475,0	8,2	1,6	5,1	96,7
475,0–427,0	48,0	2,07	23,2	119,9
427,0–405,8	21,2	3,05	7,0	129,6

График зависимости n_p от λ приведен на рис. 4. Судя по графику, для разных длин волн значение n_p весьма отличается, однако для желтого оно минимально, что подтверждает описанные ранее выводы о наихудшем для восприятия условии. Среднее значение $n_p \approx 15$.

С пороговым контрастом K_n связано число градаций m , зависящее от яркости L или светлоты S . Также значение K_n зависит от углового размера ω объекта и от яркости фона L . Общее число различимых цветов M можно получить, перемножив n , n_p и число градаций m : $M \approx 200\ 000$. Однако это значение явно преувеличено, так как пороги по λ , P и L связаны друг с другом. Так, чем меньше яркость (светлота), тем выше становится порог $\Delta_n\lambda$, то есть тем меньше различий по цветовому тону способны мы уловить.

По-видимому, реальное значение M нужно сократить раз в 10, и истинное число различаемых цветов будет примерно 20 000. В то же время, по мнению Д. Джадда [6], нормальный человеческий глаз в оптимальных условиях наблюдения может различить более 10 млн цветов, а с «коммерческой точки зрения» различимыми можно считать примерно полмиллиона цветов. Стоит напомнить также, что хорошо различаются цвета только частью сетчатки, где преобладают кол-

бочки. Для колбочкового зрения требуются и достаточные яркости: 20 кд/м² и выше. Уменьшение углового размера тестового поля (светящегося объекта) тоже приводит к повышению порогов, значительное уменьшение поля может приводить и к искажению цветовых восприятий. В колориметрии принято проводить измерения на поле менее 2°, что соответствует стандартному колориметрическому наблюдателю МКО-31.

Исходя из описанных процессов, было принято общее значение пороговых освещенностей для уверенного цветоразличия. Данные значения могут быть использованы при проектировании любых светотехнических устройств, но наиболее актуальны при применении узко-спектрального излучения светодиодов. В этом случае эффект, ожидаемый от проектируемого устройства, будет достигнут.

Спектральные характеристики чувствительности глазного аппарата и различных источников света

Помимо энергетической характеристики (освещенности) излучения, необходимого для восприятия глазом, крайне важны его спектральные параметры, определяющие цветность

сигнала. Свет, генерируемый источником, должен иметь такое спектральное распределение плотности энергетической яркости, которое обеспечивало бы однозначное присвоение ему того или иного цвета [7, 8]. В случае со светотехническими устройствами — от осветительных приборов и светильников подсветки до больших полноцветных экранов и световых устройств отображения информации — восприятие цвета будет отражать цветопередачу и оттенки цветов увиденного. Рассмотрим далее более подробно, как осуществляется восприятие цвета глазом человека.

Каждая палочка или колбочка сетчатки глаза содержит пигмент, поглощающий излучение в каком-то участке спектра лучше, чем в других. Поэтому, если бы можно было собрать достаточное количество такого пигмента и посмотреть на него, он выглядел бы окрашенным. Согласно современным представлениям, зрительный пигмент обладает особым свойством: при поглощении им светового фотона он изменяет свою молекулярную форму и при этом высвобождает энергию, запуская таким образом цепь химических реакций, которые в конце концов приводят к появлению электрического сигнала. Пигментная молекула в своей новой форме, как правило, обладает совсем иными светопоглощающими свойствами, и если, как это обычно бывает, она поглощает свет хуже, чем в исходной форме, то говорят, что она «выцветает» под действием света. Затем сложный химический механизм глаза восстанавливает первоначальную конфигурацию пигмента.

Сетчатка содержит своего рода мозаику из рецепторов четырех типов: палочек и трех типов колбочек. Каждый тип рецепторов содержит свой особый пигмент. Разные пигменты отличаются друг от друга в химическом отношении, а в связи с этим и способностью поглощать свет с различной длиной волны. Палочки ответственны за способность человека видеть при слабых освещенностях без восприятия цвета объектов. Палочковый пигмент родопсин обладает наибольшей чувствительностью в области около 510 нм, в зеленой части спектра. Кстати, палочковый пигмент родопсин, имея максимум поглощения в зеленой



Рис. 3. Зависимость порогов цветоразличения от длины волны излучения

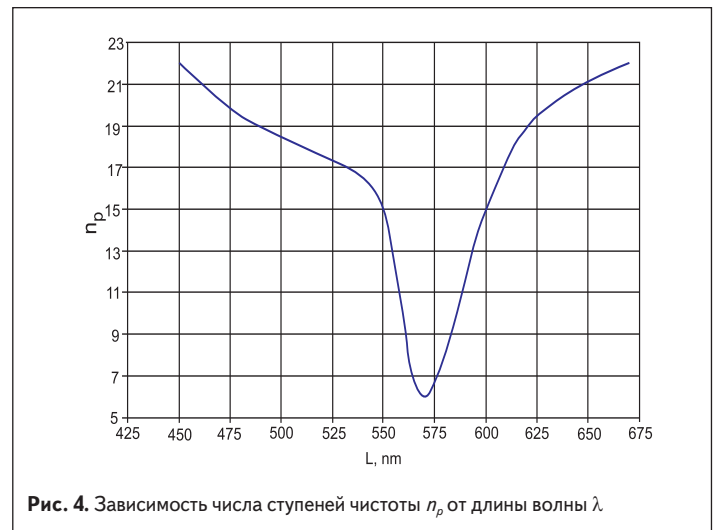


Рис. 4. Зависимость числа ступеней чистоты n_p от длины волны λ

области, отражает синие и красные лучи и поэтому сам выглядит пурпурным.

Восприятие цвета осуществляется колбочковым аппаратом сетчатки, тремя типами колбочек, со времен Гельмгольца определенных как воспринимающие синий, зеленый и красный цвета. Пигменты колбочек трех типов имеют максимумы поглощения в области 560, 530 и 430 нм. Каждый тип колбочек имеет широкие зоны чувствительности со значительным перекрытием, особенно для красных и зеленых колбочек. Относительные спектральные чувствительности колбочек разных типов приведены на рис. 5. Отметим, что свет с длиной волны, например, 600 нм вызывает наибольшую реакцию красных колбочек, пик чувствительности которых расположен при 560 нм. Он же вызывает также некоторую, хотя и более слабую, реакцию колбочек двух других типов. Таким образом, «красная» колбочка реагирует не только на длинноволновый свет, она лишь реагирует на него лучше других колбочек. Сказанное относится и к колбочкам других типов.

Ясно, что наибольшая вероятность верного восприятия цветового стимула возможна лишь тогда, когда в работе участвуют колбочки одного типа либо одновременная работа других минимальна. Такое положение дел возможно при облучении сетчатки узкополосным источником света (рис. 5), плотность энергии которого сосредоточена в узком диапазоне энергий квантов или, по-другому, длин волн ($\lambda_{\max} = 650$ нм), что хорошо видно в приведенном примере. Другими словами, действие такого источника получается «точечным», направленным только в узкую область спектральной чувствительности глазного аппарата, что и формирует в мозге отклик об однозначности цвета и в зависимости от этого совершение дальнейших действий или соответствующую обработку изображения. И если продолжать говорить о светодиодах, учитывая изображенное на рис. 5, также понятно, что наиболее специфическим цветом является желтый (доминирующая

длина волны около 590 нм), при восприятии которого не удастся избежать смешанной работы различных типов колбочек. Собственно, он изначально является результатом смешения основных цветов. Именно по этой причине требуемая пороговая освещенность на желтом максимальна и, соответственно, требуемая сила света источника должна быть существенно больше, чем у других цветов, при условии сохранения одинаковой вероятности верного восприятия цвета.

«Абсолютно черное тело» белого светодиода

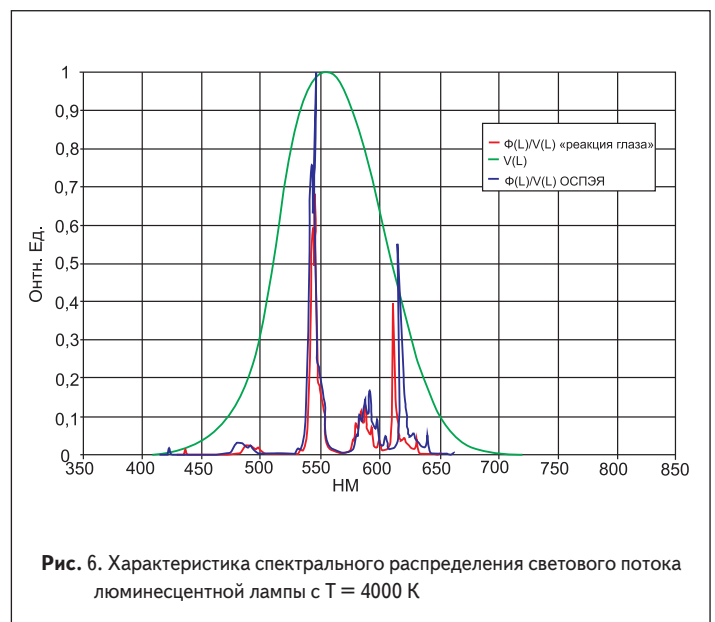
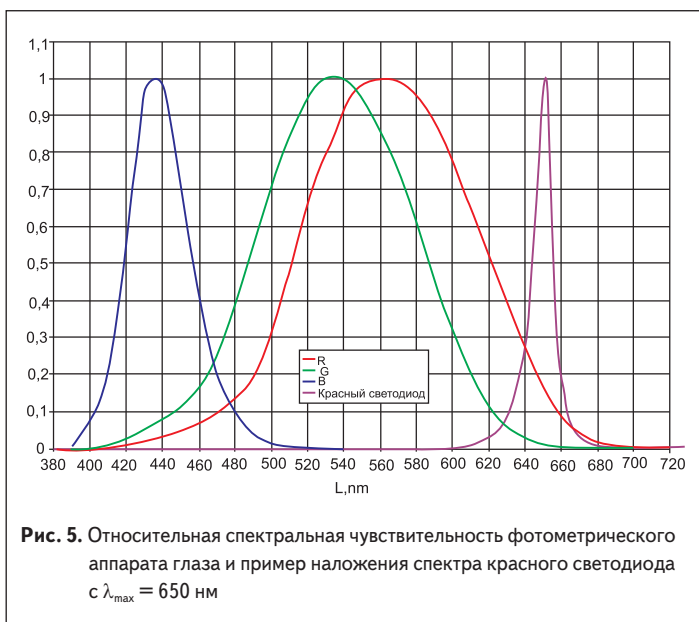
Однако квазимонохромность с некоторого времени перестала быть отличительным и приоритетным качеством светодиодов. Полупроводниковые излучающие приборы внедрились в освещение и открыли доселе неведомый класс источников света, используемых в привычных нам светильниках для различного освещения. Качество света, излучаемого комбинацией «кристалл – люминофор», оказалось заметно лучше излучения люминесцентных ламп, при этом сравнимая световая эффективность уже достигнута светодиодами. И если говорить об этом качестве «с точки зрения» восприятия такого света глазным аппаратом, то стоит снова обратиться к рис. 5 и сравнить спектральные составляющие излучения светодиодов на основе люминофора и используемых в освещении ламп: люминесцентных, накаливания и др., спектры которых приведены на рис. 6–14.

С одной стороны, понятно, что здесь, как обычно, принято говорить о том или ином индексе цветопередачи, и это не будет лишним, потому как у светодиодов он доходит до 90–93. А с другой — этот параметр, как обсуждалось в начале статьи, годится лишь при условии привязки к стандартному источнику с близкой коррелированной цветовой температурой, что некорректно с таким неравномерным спектральным распределением энергии, как, например, у люминесцентной лампы, не являю-

щейся планковским источником, с которым должно происходить сравнение. Поскольку индекс цветопередачи, как и координаты цветности, слишком оторван от физического смысла излучения и тем более от физики восприятия его глазом, предлагается провести сравнение этих источников по интегральному составу энергий излучения в восьми участках видимого спектра, кстати, рекомендованных для этого ГОСТ 23198-94 (табл. 2). Только такое обстоятельство позволит сопоставить все источники света при равных условиях.

Приведенные в таблице 2 значения следует трактовать так. За 100% взята условная энергия, ограниченная указанными диапазонами, которая имеется у кривой видности глаза $V(\lambda)$, то есть все, что может увидеть глаз. Ниже помещаются соответствующие условные энергии (интегралы под функциями относительного спектрального распределения плотности энергетической яркости) различных источников излучения, название которых приведено в левом столбце. Спектры излучения этих источников свернуты с $V(\lambda)$ и пересчитаны в процентном отношении к энергиям тех же диапазонов длин волн у $V(\lambda)$. Таким образом, получается довольно подробная картина распределения энергий источников по длинам волн, по которой можно судить о полноте заполнения всего видимого диапазона энергией излучения, а по отдельным его участкам — о том, насколько близко это излучение к идеальному, содержащему максимум энергии в спектре.

Как можно заметить, наибольшую близость с точки зрения распределения энергий к кривой видности глаза проявляет солнечный свет. Это говорит о том, что он содержит все компоненты излучения, которые глаз способен увидеть, и именно с нужной интенсивностью. Поэтому на всех участках видимого диапазона у него имеется высокий процент соответствия энергий $V(\lambda)$. Стоит отметить, что солнечный свет с более высокой цветовой температурой, чем приведено в таблице (6500 К), будет еще больше приближаться



к $V(\lambda)$, особенно в области коротковолнового участка. Это также заметно и по отношению общих интегралов, указанных в последней колонке таблицы 3.

А сейчас обратим внимание на другие источники. Лампа накаливания, например, «не-

добирает» практически половину диапазона. И это хорошо заметно на рис. 8, где приведено спектральное распределение излучения галогенной лампы, имеющей даже более высокую цветовую температуру, чем указано в таблице 2, что ставит ее в несколько лучшее положение.

Металлогалогенная лампа (рис. 7) имеет высокий индекс цветопередачи только благодаря тому, что обладает довольно равномерным, хотя и низким по весовой доле распределением энергий во всем диапазоне. Большое отличие ее излучения от солнечного, близко-

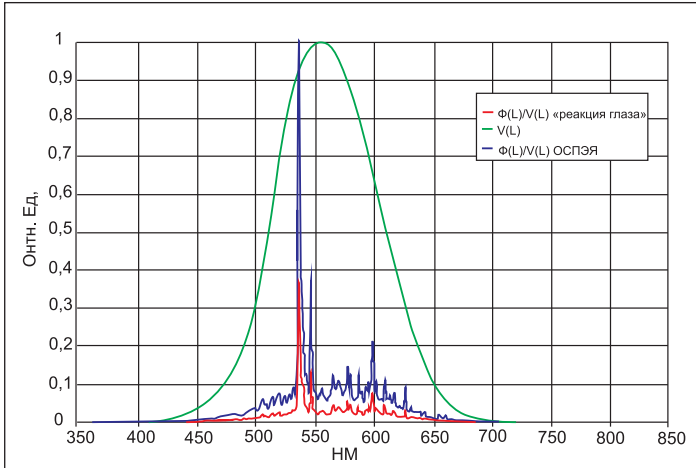


Рис. 7. Характеристика спектрального распределения светового потока металлогалогенной лампы с $T = 6700$ К

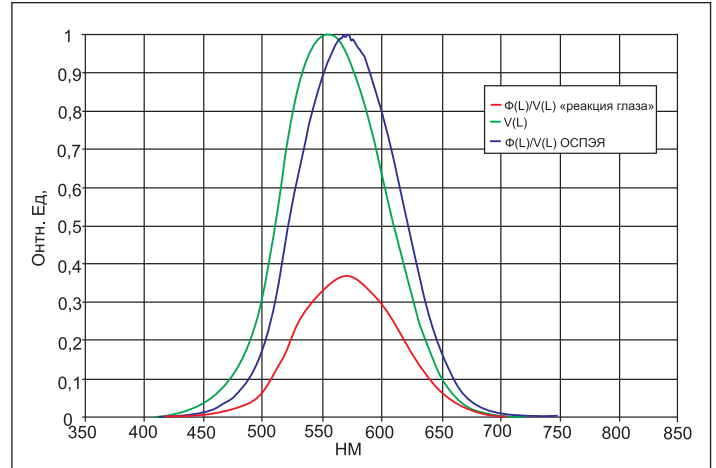


Рис. 8. Характеристика спектрального распределения светового потока лампы накаливания (галогенной) с $T = 2780$ К

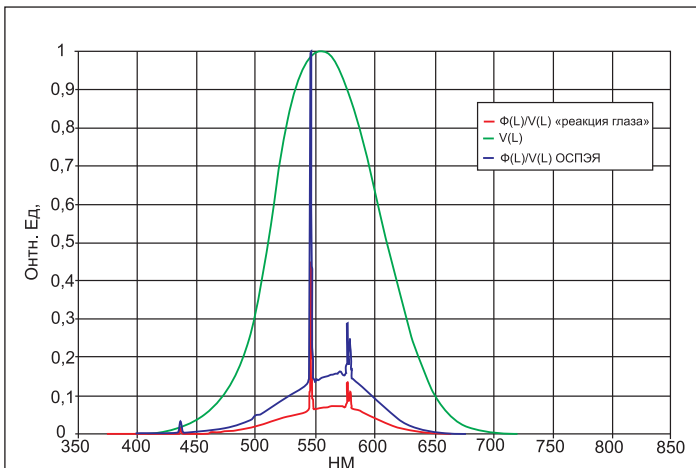


Рис. 9. Характеристика спектрального распределения светового потока компактной люминесцентной (энергосберегающей) лампы с $T = 6400$ К

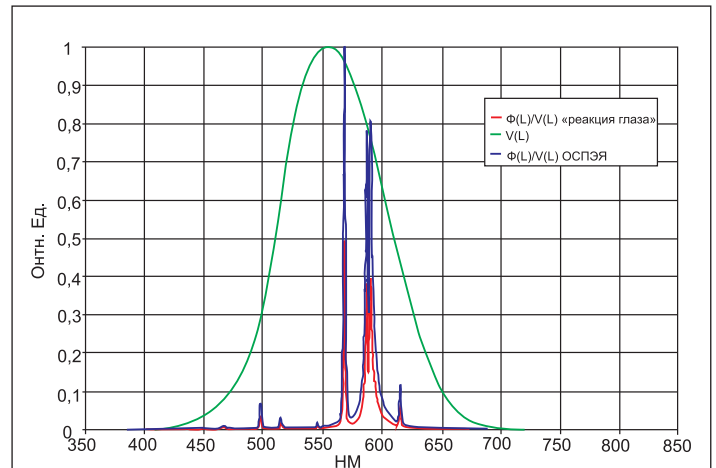


Рис. 10. Характеристика спектрального распределения светового потока натриевой лампы ДНаТ

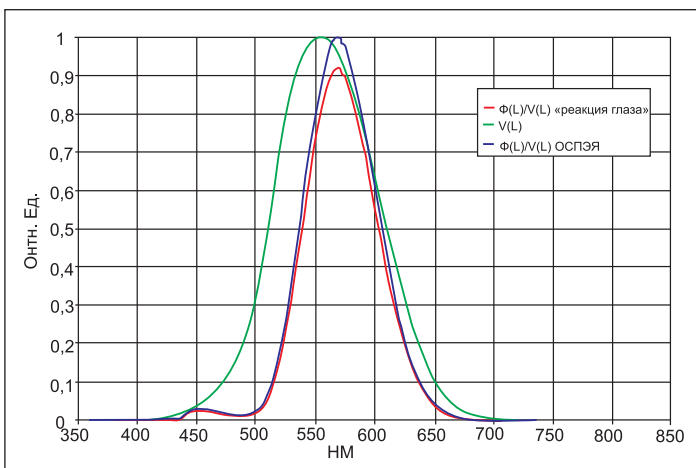


Рис. 11. Характеристика спектрального распределения светового потока белого светодиода с $T = 2900$ К

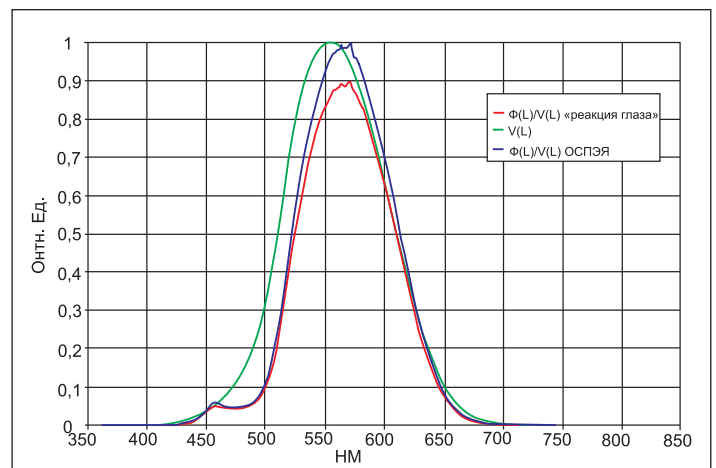


Рис. 12. Характеристика спектрального распределения светового потока белого светодиода с $T = 3200$ К

Таблица 2. Отношение интегральных энергий различных диапазонов спектра относительно $V(\lambda)$

Диапазоны по ГОСТ 23198-94, нм	Отношения интегралов в диапазонах по $V(\lambda)$, %							
	380–420	420–440	440–460	460–510	510–560	560–610	610–660	660–760
Солнце в 14 ч, июль, $T = 6150$ К	68,82	68,66	82,66	89,30	94,90	93,72	88,58	83,62
Лампа накаливания с $T = 2560$ К	3,15	4,93	7,19	13,53	22,12	33,72	46,66	60,95
Галогенная лампа с $T = 2780$ К	5,88	8,57	11,49	18,81	28,13	39,75	51,87	64,56
Люминесцентная лампа с $T = 2700$ К	0,53	5,32	0,42	1,50	6,44	3,37	13,61	0,91
Люминесцентная лампа с $T = 4000$ К	1,62	9,65	4,32	4,47	11,27	5,02	14,92	1,14
Люминесцентная лампа с $T = 6400$ К	3,28	11,85	5,52	6,45	7,26	7,67	4,08	1,35
Металлогалогенная лампа с $T = 6700$ К	13,17	9,36	6,78	6,66	11,08	6,62	5,75	5,61
Лампа ДНат, $\lambda_{dom}=588$ нм, $T = 2100$ К	0,25	0,44	0,39	0,91	0,25	10,79	2,06	0,51
Белый светодиод с $T = 2900$ К	0,34	10,92	47,06	10,58	50,89	94,30	65,03	25,95
Белый светодиод с $T = 3300$ К	2,12	28,10	83,29	35,81	73,66	95,26	87,74	46,14
Белый светодиод с $T = 6300$ К	3,67	47,10	75,49	22,89	50,95	48,64	28,73	10,94
Белый светодиод с $T = 8800$ К	3,71	46,17	81,39	18,89	36,40	35,21	21,04	8,22

Таблица 3. Отношение интегралов относительного спектрального распределения плотности энергетической яркости различных источников $E_e(\lambda)$ к интегралу $V(\lambda)$

Типы источников излучения	$\int E_e(\lambda) \times V(\lambda) d\lambda$ в % от $V(\lambda)$
Солнце в 14 ч, июль, $T = 6150$ К	92,96
Лампа накаливания с $T = 2560$ К	28,55
Люминесцентная лампа с $T = 2700$ К	5,54
Люминесцентная лампа с $T = 4000$ К	6,64
Люминесцентная лампа с $T = 6300$ К	5,41
Металлогалогенная лампа с $T = 5400$ К	4,70
Лампа ДНат с $T = 2100$ К	4,51
Белый светодиод с $T = 3300$ К	79,31
Белый светодиод с $T = 6300$ К	44,68

го по цветовой температуре, состоит в очень узких пиках высокой интенсивности, вместе с тем обладающих малой интегральной энергией, что видно по данным таблицы 3. Такое же положение дел имеется и у люминесцентных ламп (рис. 6, 9), спектр которых еще скуднее и на количество пиков (полос), и по распределению их относительно $V(\lambda)$. Для наглядности некоторые функции спектрального распределения энергии излучения источников приведены на рис. 6–14. Каждая

диаграмма распределения содержит абсолютный и относительный график функции $\Phi(\lambda) \times V(\lambda)$ и кривую видности глаза $V(\lambda)$ для ориентировки положения спектра.

Как и «полагается», самую плохую позицию с точки энергетики, воспринимаемой глазом, занимает нагреваемая лампа ДНат (рис. 10), которая из-за своего спектрального состава излучения вообще не может быть приписана к белому цвету, и поэтому ее нельзя адекватно сравнить с приведенными примерами, однако

именно желтый свет от спектральных линий натрия наиболее популярен у нас на улицах. Имея практически самый высокий показатель эффективности, свет от ДНат действительно экономически наиболее выгоден. Только следует помнить, что при этом он имеет минимальный R_a (если вообще можно применять к такому спектру этот параметр). А по колориметрическим показателям свет от ДНат попадает именно в тот промежуток между характеристиками чувствительности красных и зеленых колбочек (рис. 5), почему для равенства восприятия с излучением белого цвета, больше заполняющего интеграл относительно $V(\lambda)$, и требуется его большая интенсивность, а значит, и потребление энергии. Иными словами, чтобы одинаково верно распознать некий объект, освещаемый лампой ДНат и, например, белым светодиодом, последнему потребуются создать на объекте существенно (в несколько раз) меньшую освещенность, чем ДНат. Причина одна: в заполненности спектров излучения относительно $V(\lambda)$, как было показано ранее. Упомянутую разницу в освещенности вряд ли может достоверно охарактеризовать индекс цветопередачи R_a , имеющий

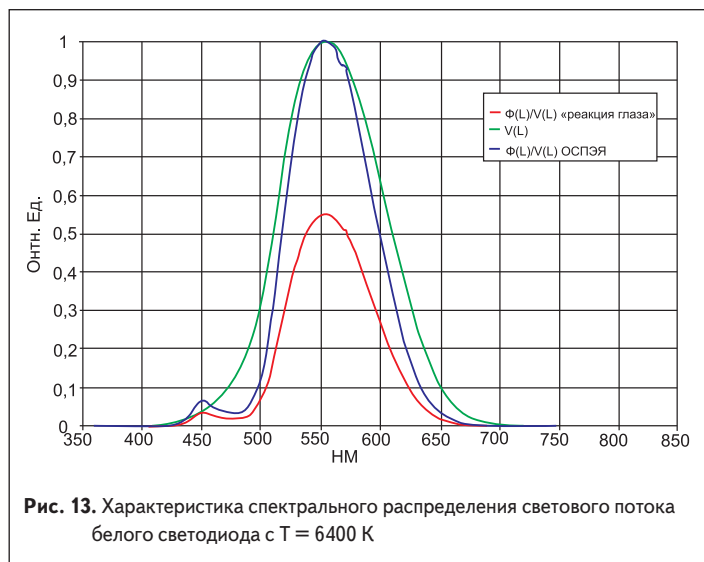


Рис. 13. Характеристика спектрального распределения светового потока белого светодиода с $T = 6400$ К

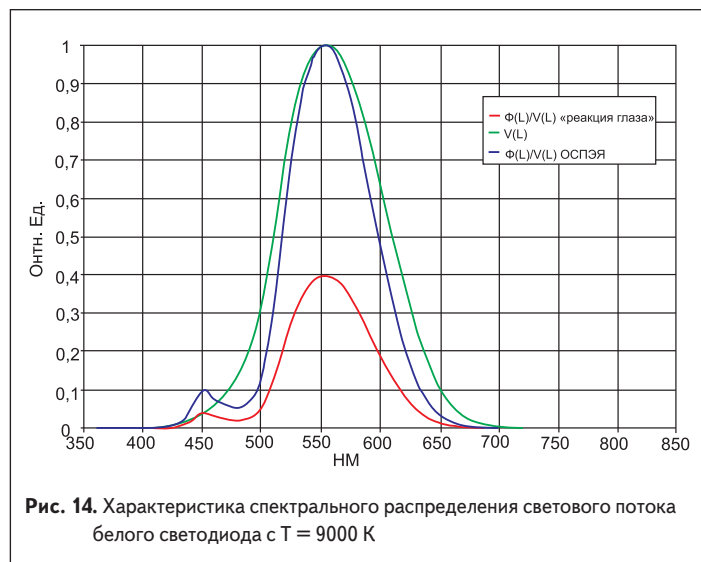


Рис. 14. Характеристика спектрального распределения светового потока белого светодиода с $T = 9000$ К

виртуальный «расчетно-сравнительный» и отдаленный физический смысл.

Из приведенного на рис. 6–14 списка источников света, используемых в освещении, только лишь у светодиодов, построенных по схеме «синий кристалл – люминофор», можно наблюдать значительное приближение описанных величин к кривой видности глаза, по крайней мере, относительно других источников. Судя по данным в таблицах 2 и 3 и рис. 6–14, спектр излучения белых светодиодов с различными коррелированными цветовыми температурами, особенно низкими (рис. 11, 12), имеет очень высокий процент соответствия $V(\lambda)$ на протяженном участке видимого диапазона, достигая 95% в области желтого, что говорит о его непрерывности и высокой степени подобия основному естественному источнику. Это обстоятельство могло быть выявлено лишь толкованием данных спектрального распределения, потому как расчет индекса цветопередачи, исходя из координат цветности, не отражает качественного показателя спектрального распределения энергий, хотя и относительного. Из данного утверждения можно сделать вывод о том, что полупроводниковый свет на основе белых светодиодов, используемый для освещения, не только достиг своей эффективности относительно традиционных ламп, но и превосходит их в части комфортности восприятия глазным аппаратом. Что открывает куда большие перспективы по его применению, чем когда-то были у ламп относительно свечей и керосиновых фонарей.

Куда выведет кривая видности?

Опорной зависимостью для оценки качественного показателя спектрального распределения энергии источников может служить только кривая видности $V(\lambda)$, которая и определяет, какая доля излучения будет восприниматься глазом. Чувствительность глаза к излучению различных длин волн характеризуется функцией видности $V(\lambda)$ — относительной спектральной световой эффективностью излучения. Эта величина нормирована: за единицу принята чувствительность $V(\lambda)$ при длине волны λ , соответствующей максимальной чувствительности глаза. Значения относительной спектральной световой эффективности излучения стандартизованы Международной комиссией по освещению (МКО) [7, 9] как для дневного зрения (яркость около 100 кд/м^2), так и для адаптированного к темноте (яркость менее 10^{-4} кд/м^2) глаза. При промежуточных значениях яркости адаптации в зрительном процессе участвуют и палочки, и колбочки.

Форма кривой видности глаза имеет большое значение для оптимального проектирования осветительной аппаратуры. Если задаться вопросом: какова должна быть температура абсолютно черного тела (АЧТ), при которой доля энергии видимого излучения будет максимальной, то расчеты покажут, что энергия видимого излучения абсолютно черного тела с различной температурой — 2000, 4000, 6000, 8000, 12 000 К — составляет соответственно

Таблица 4. Доля энергии видимого излучения АЧТ с различной цветовой температурой

Температура источника Т, К	Доля энергии видимого излучения $d(V(\lambda))$, отн. ед.
2000	0,017
4000	0,318
6000	0,497
8000	0,477
12 000	0,186

такую часть от полной энергии излучения, которая показана в таблице 4.

Следовательно, наиболее выгодной температурой будет 6000 К, при которой половина всей энергии приходится на видимое излучение. Это обстоятельство, а также данные расчетов, приведенные в таблицах 2 и 3, свидетельствуют о том, что спектральная чувствительность глаза в процессе эволюции сформировалась под влиянием солнечного излучения.

Однако самые последние исследования в области физики работы глазного аппарата выявили так называемый третий тип фоторецепторов в сетчатке, названный NF [10]. Предположительно он мало участвует в фотометрическом процессе восприятия, формирующего информацию об увиденном в мозге, в основном руководя перестроением оптической системы глаза (изменением диаметра зрачка) в зависимости от освещенности сетчатки. Являясь, тем не менее, фоторецептором и имея свою спектральную чувствительность, он создает так называемые незрительные, «технические» сигналы управления площадью зрачка, таким образом, напрямую не влияя на картину восприятия, а лишь косвенно, через процесс аккомодации. Утверждается также, что данный рецептор работает только с высокими уровнями освещенности сетчатки, имеет максимум чувствительности в области 480–495 нм и существенно влияет на циркадные ритмы организма.

Указанный диапазон длин волн (табл. 2) содержит значительную часть энергии излучения только у светодиодов, таким образом, делая их самыми перспективными источниками света с учетом результатов приведенных исследований. Очевидно, что освещение с насыщенным сине-зеленым участком спектра (480–500 нм) улучшает восприятие света и повышает остроту зрения. Однако так как ранее предложенное объяснение этого факта было предположительно основано на участии палочковых фоторецепторов, связанные с ним преимущества для зрительной функции были недостаточно оценены светотехниками и архитекторами. Возможно, открытие NF будет стимулировать широкое использование этих преимуществ.

Общей мерой способности нашего зрительного аппарата различать мелкие детали и отчетливо отображать края предметов является острота зрения. При типичных уровнях освещения в помещениях основной фактор, определяющий резкость фокусировки, —

оптическое качество глаза (а не уровень освещенности). Острота зрения повышается с уменьшением размера зрачка, потому что отсекаются лучи с повышенной абберацией. Освещение с обогащенным сине-зеленым участком спектра или с повышенной цветовой температурой ламп эффективнее уменьшает размер зрачка, чем простое повышение уровня освещения, влекущее рост блеска и потребления световой энергии.

Итак, указанное освещение, повышая остроту зрения, будет также эффективно способствовать повышению четкости и резкости зрительных сцен. К тому же, вследствие того, что освещение с повышенной цветовой температурой воспринимается более ярким, есть возможность увеличения эффективности использования энергии по сравнению с освещением с пониженной цветовой температурой. С учетом понимания истинного механизма рассматриваемых явлений использование названных преимуществ может стать важным фактором в светотехническом проектировании и сделать применение светодиодного освещения приоритетным направлением уже в ближайшее время.

Литература

1. CIE (Commission Internationale de l'Eclairage), Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources. 1st ed. Publication CIE № 13 (E-1.3.2). 1965.
2. Агафонов Д. Р., Мурашова М. А., Никифоров С. Г., Пинчук О. П., Столяревская Р. И. Исследования визуального восприятия красных железнодорожных светофоров на основе светоизлучающих диодов // «Светотехника». 2003. № 6.
3. Agaphonov D., Murashova M., Niklphorov S., Pinchuk O., Stolyarevskaya R. Red LED Railway Traffic Lights Visual Perception Research // CIE session 2003, San Diego. Proceedings, volume 2.
4. Хьюбел Д. Глаз, мозг, зрение / Пер. с англ. М.: Мир, 1990.
5. Физиология сенсорных систем: Ч.1. Физиология зрения. Л.: Наука, 1971.
6. Джадд Д., Вышецкий Г. Цвет в науке и технике. М.: Мир, 1978.
7. Официальные рекомендации Международной комиссии по освещению (МКО), публикация МКО № 2.2 (ТС-1.6) Цвета световых сигналов. 1975.
8. Никифоров С.Г. Умом Россию не понять: в России можно только мерить. Или физические аспекты восприятия полупроводникового света человеческим глазом // Компоненты и технологии. 2008. № 12.
9. Технический доклад МКО «Измерения СИД». (Technical report «Measurement of LED's»). CIE127-1997.
10. Берман С. М., Клиер Р. Д. Недавно открытый фоторецептор человека и предыдущие исследования в области зрения // Светотехника. 2008. № 3.
11. Хацевич Т. Н. Физиологическая оптика / Уч. пособие. Ч. 1. Новосибирск: СГГА, 1998.