

Умом Россию не понять, в России можно только мерить, или Физические аспекты восприятия полупроводникового света человеческим глазом

Сергей НИКИФОРОВ,
к. т. н.

В статье проведен анализ физических аспектов работы фотометрического аппарата глаза человека под действием излучения от различного типа источников. Особое внимание уделено сравнению восприятия классических источников света с восприятием полупроводникового света. Приведены результаты исследований параметров железнодорожных светофоров на основе ламп и светофильтров-линз как яркого примера создания узкополосного излучения, которое одним из первых претендует на использование квазимонохромного света от светодиодов. Указаны положительные стороны применения светодиодов и проблемы их использования. Приведенные итоги сравнительных измерений спектральных характеристик ряда источников света с параметрами светодиодов на основе синего кристалла и люминофора, а также особенности восприятия глазом их излучения определили положение твердотельных источников света среди других с точки зрения их применения в светотехнических устройствах. Статья может быть полезна разработчикам устройств светотехники, инженерам-проектировщикам, производителям и разработчикам светосигнальной техники.

Место светодиодов в светотехнике

Сфера применения светотехнических устройств на основе светодиодов расширяется с каждым днем. Сейчас полупроводниковые источники света настолько прочно вошли в наш быт, что мы уже доверили им освещение вспомогательных помещений и улиц, дежурный и аварийный свет, полностью положились на них в сигнальной технике — светофорах и навигационных световых системах. Теперь на карту поставлено наше зрение при чтении в электричках и общественных местах, которые освещены белыми светодиодами. На карту поставлена и наша жизнь, которая зависит от того, насколько правильно мы определили цвет сигнала светофора на светодиодах при езде на автомобиле, или верно ли это сделал машинист поезда, на котором мы едем. Мы подпустили светодиоды слишком близко к себе, а точнее, к нашим глазам, поэтому должны разобраться в том, что же все-таки они сулят нам своим присутствием в самых, как стало понятно, ответственных местах.

В статье мы рассмотрим восприятие излучения светодиодов глазом с точки зрения физи-

ки работы оптической системы и фотометрической структуры глазного аппарата, проведя сравнение с восприятием излучения от других источников, уже вошедших в классические виды освещения и используемых в системах световой сигнализации. Такой подход будет объективен и позволит выявить максимум положительных факторов применения полупроводникового света.

Так, например, значительный прогресс в подвижной части железнодорожной техники определяет существенный рост скорости движения составов и, соответственно, транспортных потоков по ж/д магистралям. Увеличение скорости движения повышает требования к средствам световой сигнализации, светофорам, где верность и скорость распознавания цвета сигнала играет определяющую роль в принятии решения о характере движения. Детальное исследование фотометрических и колориметрических характеристик существующих светофоров на лампах накаливания, спроектированных с учетом прежних стандартов, и светодиодных показало существенную разницу в восприятии данных сигналов глазом человека. Некоторые физические аспекты зрительного процесса нельзя

игнорировать при формировании технических требований к светосигнальным светодиодам устройствам такого уровня, как ж/д светофоры, потому как их учет при проектировании существующих в настоящее время линзовых комплектов (ЛК) ограничивался в основном возможностью ламп. В этом также причина начавшегося с появлением светодиодов пересмотра фотометрических норм и колориметрических границ ж/д светофоров, установленных в ГОСТ 25695-91 [8, 9]. Ошибок в нормативных документах и технических требованиях можно избежать, лишь детально сопоставив механизмы восприятия и параметры излучения полупроводниковых источников света.

Комплекс измерений фотометрических и колориметрических параметров, проведенных на самом современном оборудовании, позволил спрогнозировать пути возможной замены ламповых источников света на светодиодные, обозначил важные факторы, как тормозящие, так и оправдывающие применение светодиодов в светосигнальных устройствах. Определено, что квазимонохроматическое излучение светодиодов нельзя рассматривать как эквивалент ламповому со

светофильтром-линзой (в ж/д светофоре) с точки зрения сравнения восприятия глазом, соответственно, пороговые значения освещенности (минимальная чувствительность глаза), являющиеся исходными цифрами для формирования ГОСТ, для светодиодных светофоров не однозначны. Общая тенденция применения светодиодов — это увеличение дальности и уменьшение времени обнаружения сигнала наблюдателем. Стоит отметить также существенную (в разы) экономию электроэнергии и затрат на обслуживание. Однако ряд проблем, вызванных особенностями работы полупроводниковых излучающих структур, не позволяет применять такие структуры без оценки всех плюсов и минусов их эксплуатации.

Энергетические характеристики излучения источников: сколько необходимо квантов, чтобы мы их заметили?

Поскольку самым распространенным и наиболее изученным является квазимонохроматический полупроводниковый свет, в отличие от белых светодиодов с применением люминофора, сравнение его восприятия с классическими источниками — лампами накаливания и люминесцентными — будет максимально показательным и объясняющим различия в этом восприятии. Однако для такого сравнения необходимо взять узкополосный источник, сформированный на основе ламп, но с близкими характеристиками по признаку монохромности. Как нельзя лучше для таких целей подойдут ж/д светофоры, замена ламп на светодиоды в которых стоит на грани массового применения. Эти светофоры работают во всем приемлемом температурном диапазоне и существующем промежутке соотношений контрастности и яркости, наиболее полно используя как динамические возможности глазного аппарата, так и его способность воспринимать цвета в различных фотометрических условиях наблюдения.

Большинство фотометрических характеристик ж/д светофоров на основе ламп и линзовых комплектов (ЛК) зависят и определяются только параметрами исходных источников — ламп накаливания. Наиболее распространены лампы мощностью 15 Вт, которые при штатном напряжении питания (12 В), обладая из-

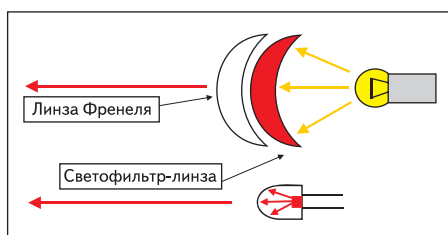


Рис. 1. Пояснение работы оптических систем ЛК и светодиодов

Таблица 1. Энергетические характеристики светофоров

| Цвет | Световой поток | | | 1 светодиод, лм | Энергопотребление, Вт | | |
|-------------|----------------|---|----------------------------|-----------------|-----------------------|-----------|-----------|
| | ЛК, лм | Доля излучения относительно светового потока, собранного ЛК без светофильтра, % | Доля излучения от лампы, % | | ЛК | Светодиод | Отношение |
| Красный | 2,7 | 22,9 | 1,9 | 3 | 15 | 0,08 | 187,5 |
| Желтый | 9,85 | 83,5 | 6,8 | 3,5 | 15 | 0,24 | 62,5 |
| Зеленый | 4,8 | 40,7 | 3,3 | 4,5 | 15 | 0,15 | 100,0 |
| Синий | 0,58 | 4,9 | 0,4 | 0,6 | 15 | 0,15 | 100,0 |
| Лунно-белый | 10,4 | 88,1 | 7,2 | 4 | 15 | 0,45 | 33,3 |

вестной эффективностью преобразования — 9–11 лм/Вт, излучают порядка 150 лм светового потока с цветовой температурой около 2400 К. Все цвета сигналов светофоров формируются оптической системой — линзовым комплектом (ЛК), в который входят: светофильтр — линза, «вырезающая» нужный участок спектра излучения лампы и определяющая цвет (об этом будет подробно сказано далее) и вторая линза — Френеля, имеющая большую оптическую силу (рис. 1) [8, 9]. Лампа, а точнее — ее тело накала, расположена в фокусе обеих линз ЛК. Оптическая система светодиода, как известно, представлена излучающим кристаллом и линзой. Преобразование электрической энергии в световую (излучательная рекомбинация) происходит в полупроводниковом кристалле и изначально имеет необходимые цветовые характеристики, определяющиеся материалом гетероструктуры, на которой построена активная область *p-n*-перехода. Поэтому в светодиоде нет нужды в светофильтрах.

В таблице 1 приведены энергетические характеристики светофоров на ЛК и на основе светодиодов.

В трех колонках таблицы приведены характеристики светового потока различных цветов светоблоков на лампах. Параметры работы светофильтров можно определить при рассмотрении доли излучения, используемой для формирования необходимого спектра соответствующего цвета относительно светового потока, собранного ЛК без светофильтра. Очевидно, что при использовании одинаковых ламп эти величины (от 5 до 88%) не могли и не могут быть другими: это все, на что способна лампа в таком варианте оптической схемы. Поэтому, если проанализировать эти значения относительно всего светового потока лампы, то можно заметить, что всего лишь единицы процентов исходного излучения лампы используются для формирования полезного сигнала светофора. В то же время, все 100% производимого светодиодом светового потока направляются на наблюдателя. Поэтому по своей эффективности в большинстве случаев лишь один светодиод на основе кристалла размером всего 0,25×0,25 мм может с сохранением фотометрических параметров светофора заменить целый линзовый комплект с лампой в 15 Вт. При этом он будет потреблять в сотни раз меньше электрической энергии, судя по данным таблицы 1. Однако совершенно понят-

но, что никто не будет строить светофор на одном или нескольких таких светодиодах хотя бы из конструктивных соображений (впрочем, предложения уже разработаны, и они оправданы своими параметрами) — здесь обсуждалась лишь световая эффективность полупроводниковых источников в сравнении с ламповыми.

Все указанные характеристики в части светового потока и формирования необходимого значения осевой силы света и пространственного распределения светового потока имеют лишь один смысл: создать нужную освещенность сетчатки глаза машиниста с целью верного распознавания цвета сигнала на максимально большом расстоянии. В соответствии с существующим ГОСТ 25695-91 это расстояние составляет 1000 м для прямых перегонных участков магистрали.

В таблице 2 представлены данные о пороговой освещенности (минимальной необходимой энергии света, вызывающей такую фотохимическую реакцию чувствительного аппарата глаза, при которой цвет источника будет верно воспринят с максимальной вероятностью) на разных цветах сигналов, нормируемые и полученные для ЛК, а также приведены значения осевой силы света светодиодных ж/д светофоров. Значения пороговой освещенности были получены исходя из условий достоверного определения машинистами цвета сигнала, сформированного светоблоком на основе ЛК светофора на расстоянии 1000 м. Предписанные ГОСТ 25695-91 значения осевой силы света создают на таком расстоянии освещенность, приблизительно в 1,5–2 раза большую, чем пороговая [10]. Однако самые современные исследования физики работы глаза [11, 12, 14] показали, что для требуемой вероятности правильного определения цвета сигнала с угловым размером, соответствующим светофорному, требуется освещенность, в 5–10 раз превосходящая указанную пороговую и одинаковая для

Таблица 2. Данные о пороговой освещенности

| Цвет | Пороговая освещенность, лк×10 ³ | Сила света по ГОСТ, кд | Сила света реальная, кд | Сила света на светодиодах, кд |
|-------------|--|------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| Красный | 1,20 | 2100 | 1330 | 6000 |
| Желтый | 2,49 | 4350 | 3890 | 15 000 |
| Зеленый | 1,49 | 2600 | 2510 | 12 000 |
| Синий | 0,09 | 150 | 252 | 5000 |
| Лунно-белый | 1,43 | 2500 | 4100 | 10 000 |

всех цветов. Такой вывод обусловлен большим разбросом параметров светочувствительных элементов глаз и существенной разницей в объеме аккомодации глаза в зависимости от возраста машиниста (отличие в объеме аккомодации составляет до 10 раз при возрасте 17 и 60 лет) [11]. Также принято во внимание и время правильного опознания цвета, которое в нормальном режиме составляет около 1 с [1], а в условиях плохой видимости или ночного режима, а также при возрастных изменениях может составить до 3–4 с, что при скорости поезда около 200 км/ч сократит дистанцию до светофора примерно на четверть, и машинист просто не успеет предпринять какие-либо действия. Тем более, что последние решения, принятые на ж/д транспорте, говорят об увеличении скорости движения поездов до 250 км/ч.

В работе [11] указывается на независимость значения минимально обнаруживаемой яркости глазом от размера источника при пороговых значениях освещенности, которые характерны для достоверного выделения светящегося объекта без определения цвета на темном фоне. Между указанными в ГОСТ 25695-91 значениями пороговой освещенности и теми, что приведены в [11], есть соответствующая пропорциональность. Принято считать, что при яркости фона 10^{-6} кд/м² (практической темноте) пороговый блеск для центрального зрения равен $2 \cdot 10^{-8}$ лк, а для периферического — $2 \cdot 10^{-9}$ лк. Обратим внимание, что для наблюдения очень слабых источников света необходимо, чтобы их изображение на сетчатке получалось не в ее центре, а на периферии, где чувствительность выше. В результате специального исследования этого вопроса было установлено, что максимум световой чувствительности темно-адаптированного 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 как:

$$L \times \gamma^n = \text{const}, \quad (1)$$

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 светящегося светоблока при условии применения светодиодов относительно проекции нити накала (рис. 2) приводит к существенному увеличению вероятности верного распознавания цвета сигнала при прочих равных условиях [1, 6]. Вероятно, здесь в сумме эффектов может сказываться и квазимонохроматическое свойство излучения светодиодов. Абсолютный световой порог зависит и от длительности предъявления объекта, то есть от времени экспозиции.

Все упомянутые характеристики восприятия являются параметрами адаптации зрительного аппарата глаза. Глаз обладает чрезвычайно важной биологической способностью приспосабливаться — 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:

- 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);
- 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 площади, 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 [12, 14]. 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. 2. 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. 3. При любых яркостях 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 . Различия по яркости определяется контрастом K , а пороговое различие по яркости — пороговым контрастом K_n . Пороговые различия по цветовому тону обозначаются как $\Delta n\lambda$, а по чистоте — ΔnP .

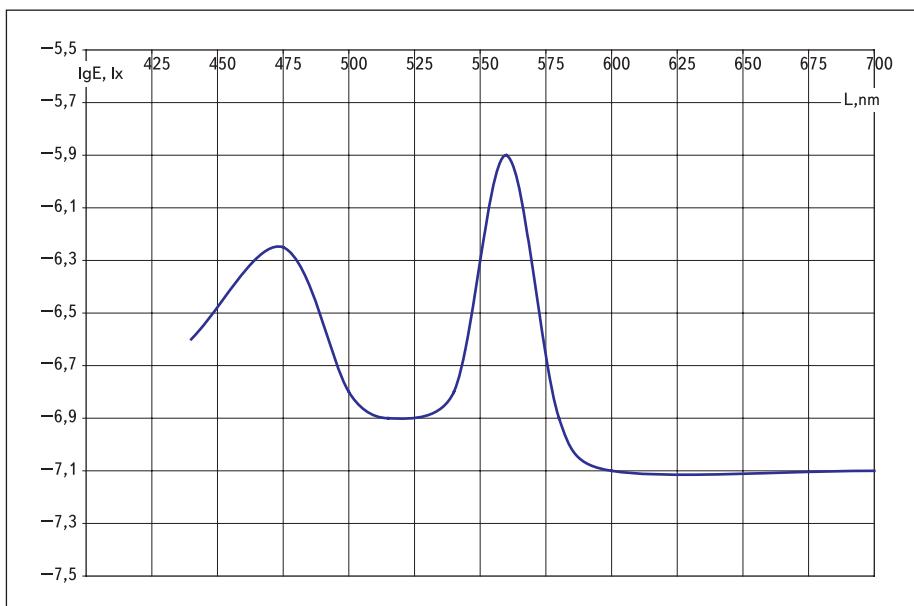


Рис. 2. Зависимость хроматического порога от длины волны при наблюдении на темном фоне

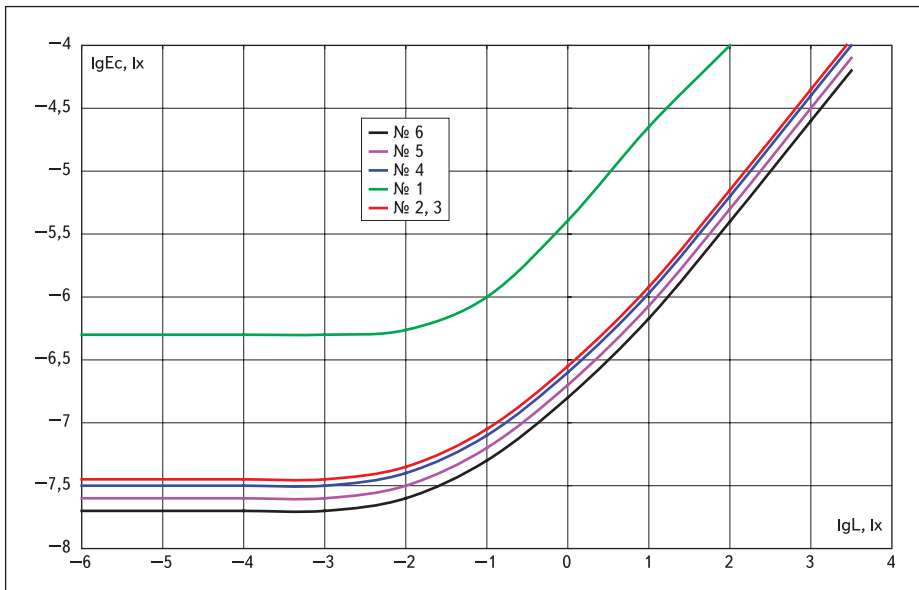


Рис. 3. Зависимость хроматических порогов от яркости фона: 1 — желтый № 2 ($\lambda = 565$ нм); 2 — зеленый ($\lambda = 520$ нм); 3 — желтый № 1 ($\lambda = 590$ нм); 4 — синий ($\lambda = 410$ нм); 5 — красный ($\lambda = 610$ нм); 6 — ахроматический

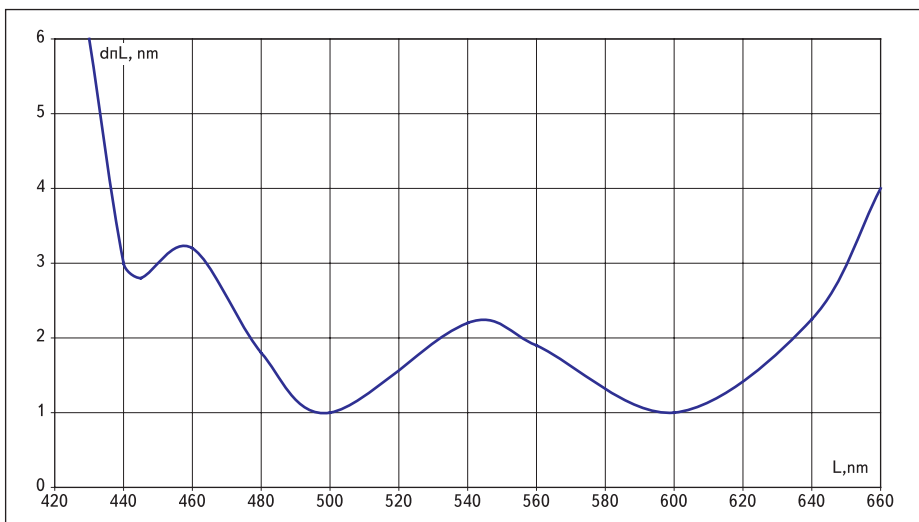


Рис. 4. Зависимость порогов цветоразличения от длины волны излучения

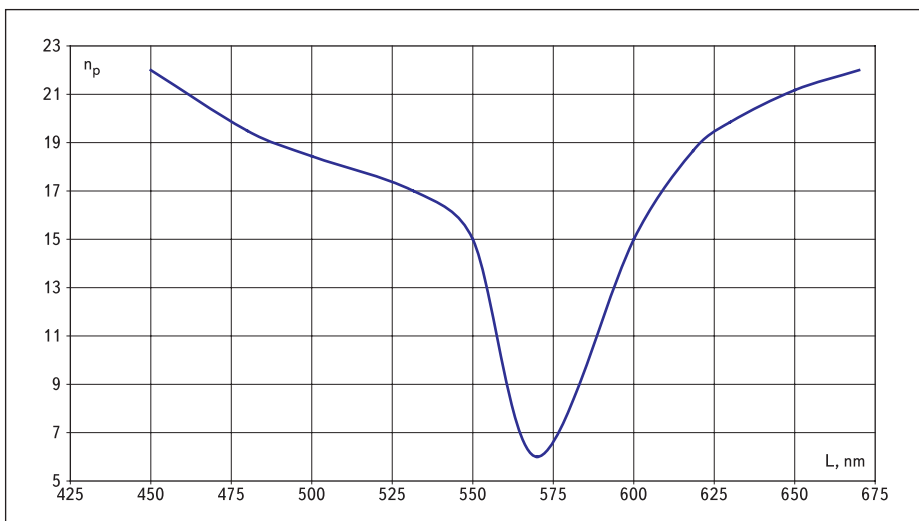


Рис. 5. Зависимость числа ступеней чистоты n_p от длины волны λ

Таблица 3. Зависимость числа порогов цвето-различения от спектрального диапазона длин волн

| Границы спектральных участков, нм | $\Delta\lambda$, нм | $\Delta n\lambda$, нм | n_Δ | 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 |

Чувствительность глаза к различению цветового тона неодинакова в различных областях спектра (табл. 3). В таблице 3 указаны границы спектральных участков, интервал каждого участка $\Delta\lambda$, значение порогов $\Delta n\lambda$ в данном интервале, число порогов n_Δ в каждом интервале и число порогов n от крайней границы спектра до данного интервала. Значение n , равное 129,6, показывает, что во всем интервале видимого спектра мы можем различать около ста тридцати градаций цветового тона. Итак, можно принять $n = 130$. На рис. 4 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 . График зависимости n_p от λ приведен на рис. 5. Как видно на графике, для разных длин волн значение n_p так же различно, однако для желтого оно минимально, что подтверждает описанные ранее выводы о наихудшем для восприятия условии. Среднее значение $n_p \approx 15$.

С пороговым контрастом Kp связано число градаций m , зависящее от яркости L или светлоты S .

Также значение Kp 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 [13], нормальный человеческий глаз в оптимальных условиях наблюдения может различить более 10 млн цветов, а с «коммерческой» точки зрения различимыми можно считать примерно полмиллиона цветов.

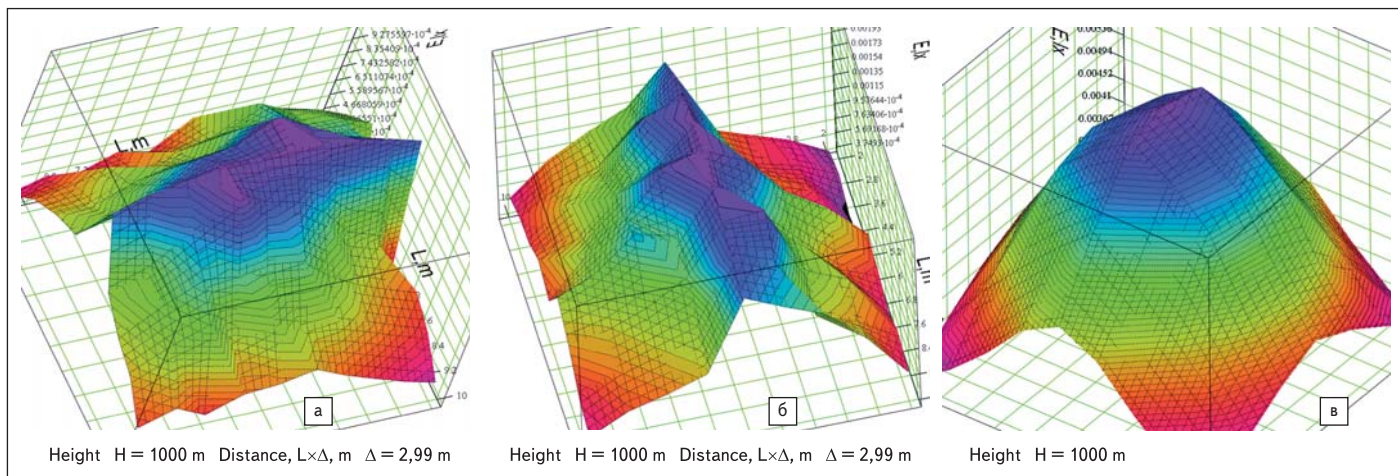


Рис. 6. Распределение освещенности: а) красного светоблока на ЛК; б) зеленого светоблока на ЛК; в) красного на основе светодиодов на расстоянии 1000 м от наблюдателя

Стоит напомнить также, что хорошо различаются цвета только частью сетчатки, где преобладают колбочки. Для колбочкового зрения необходима и достаточная яркость: 20 кд/м^2 и выше. При уменьшении углового размера тестового поля (светящегося объекта) повышается и пороговый уровень, значительное уменьшение поля может приводить к искажению цветовых восприятий. В колориметрии принято проводить измерения на поле менее 2° , что соответствует стандартному колориметрическому наблюдателю МКО-31.

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

Учитывая сказанное, при анализе данных таблицы 2 также можно заметить, что светофоры на основе светодиодов обладают значительным потенциалом для создания осевой силы света светоблока, который может быть использован для формирования необходимой освещенности и на большем, чем 1000 м, расстоянии, что, безусловно, скажется на выигрыше времени для принятия решения и, как следствие, на повышении безопасности движения транспортных средств в целом. В то время как линзовые комплекты на лампах, как мы выяснили ранее (табл. 1), работают на пределе возможности и не имеют запаса по осевой силе света, тем более что световой поток ламп уже через 1000 часов работы уменьшается примерно на треть, светодиоды не имеют такого недостатка, и, как хорошо известно, их продолжительность работы с сохранением 95% светового потока может продолжаться до 20 000–25 000 часов.

На рис. 6 наглядно показано распределение освещенности от светофора на основе ЛК

и светодиодного в плоскости, отстоящей от него на 1000 м.

Прецизионные измерения углового распределения силы света в большом количестве плоскостей пространства, выполненные с помощью двухкоординатного гониофотометра с угловым разрешением поворота в $0,02^\circ$, позволили с высокой точностью воссоздать картину распределения освещенности в плоскости наблюдения машиниста и определить фотометрические условия восприятия сигнала. Здесь стоит напомнить, что данный метод высокоточного измерения пространственного распределения светового потока с успехом используется при изучении деградационных характеристик светодиодов и полупроводниковых излучающих структур [3, 4]. Исследование изменений в диаграммах пространственного распределения плотности светового потока излучающих кристаллов на основе гетероструктур или светодиодов, измеренных в разное время, при различных условиях или режимах наработки, позволяет делать выводы об изменениях в работе самой структуры, причины которых могут быть объяснены на уровне физики работы всего кристалла. Суть метода состоит в измерении большого числа диаграмм пространственного распределения силы света в разных плоскостях с последующим расчетом интегрального светового потока и его плотности в различных точках диаграмм. Сравнение полученных зависимостей, измеренных в различное время наработки, дает картину изменения светового потока в каждой точке диаграммы в процессе наработки. Точность измерения диаграмм будет определять точность установления как самой разницы в световом потоке, так и места в диаграмме, и, следовательно, соответствующего сектора излучающей структуры, нити накала лампы или сегмента горелки металлогалогенной лампы. Таким образом, предложенный метод можно использовать для изучения характеристик распределения светового потока в пространстве любых устройств светотехники, а также

высокоточных расчетов освещенности от них (рис. 6).

На рис. 6 также можно заметить, что пятно засветки представлено в виде явно выделяющейся по значению большей освещенности линии шириной 5–7 м и длиной 30–35 м. Это проекция нити накала лампы на расстоянии 1 км. Следует добавить, что пятно засветки от светодиодного светоблока всегда будет представлено распределением освещенности в виде размытых концентрических колец диаметром до 40 м (на расстоянии 1 км) по уровню $0,5E_{\text{max}}$, как правило, с максимумом в центре. Это обстоятельство создаст большую по сравнению с нитью накала лампы площадь с пороговой освещенностью, что также хорошо заметно при сравнении графиков на рис. 6, и что может существенно облегчить настройку светофора на нужную точку восприятия.

Спектральные характеристики чувствительности глазного аппарата и источников света: природа создала светофоры гораздо раньше инженеров, заставив глаз различать цвета

Помимо энергетической характеристики (освещенности) излучения, необходимого для восприятия глазом, крайне важны его спектральные параметры, определяющие цветность сигнала. Свет, генерируемый светоблоком светофора, должен иметь такое спектральное распределение плотности энергетической яркости, которое обеспечивало бы однозначное присвоение ему того или иного цвета [10]. В случае с другими 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 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. 7. Отметим, что свет с длиной волны, например, 600 нм вызывает наибольшую реакцию красных колбочек, пик чувствительности которых расположен при 560 нм, он 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. Совершенно очевидно, что наибольшая вероятность верного восприятия цветового стимула возможна лишь тогда, когда в работе участвуют колбочки одного типа, либо одновременная работа других минимальна. Такая ситуация возможна только при облу-

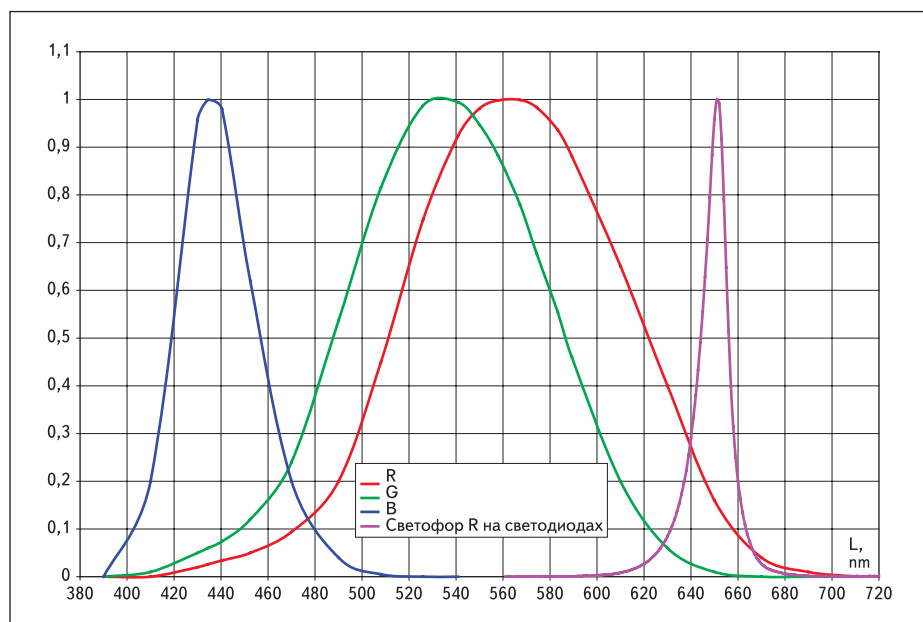


Рис. 7. Относительная спектральная чувствительность фотометрического аппарата глаза и пример наложения спектра красного светофора на светодиодах с $\lambda_{\max} = 650$ нм

чении сетчатки узкополосным источником света (рис. 7), плотность энергии которого сосредоточена в узком диапазоне энергий квантов или, иначе, 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 светофорах, исходя из рис. 7, также понятно, что наиболее проблемным цветом является желтый (доминирующая длина волны около 590 нм), при восприятии которого не удастся избежать смешанной работы различных типов колбочек, да и собственно, желтый изначально является плодом смещения основных цветов. Именно по этой причине требуемая пороговая освещенность на желтом максимальна, и, соответственно, требуемая сила света светоблока должна быть существенно больше, чем у других цветов при условии сохранения одинаковой вероятности верного восприятия цвета.

Переходя к теме узкополосности спектра энергий сигналов, обратимся к таблице 4,

Таблица 4. Данные о спектральном составе излучения светоблоков на ЛК и светодиодах

| Цвет | Полуширина относительного спектрального распределения излучения по $V(\lambda)$, нм | | Интеграл абсолютного спектра излучения по $V(\lambda)$ | |
|---------|--|------------|--|------------|
| | ЛК | Светодиоды | ЛК | Светодиоды |
| Красный | 36,5 | 10,0 | 5,3 | 2,15 |
| Желтый | 82,3 | 15,5 | 29,7 | 13,2 |
| Зеленый | 62,0 | 28,0 | 56,6 | 18,6 |
| Синий | 106,0 | 18,5 | 2,4 | 1,5 |

в которой приведены данные о спектральном составе излучения светоблоков на ЛК и светодиодах, а на рис. 8 — наглядный пример табличных данных.

Распределение плотности энергетической яркости характеризуется полушириной спектра, и, соответственно, чем она меньше, тем уже спектр. Судя по данным таблицы ясно, что ширина спектра по уровню половины интенсивности у светодиодов меньше в 3–6 раз по сравнению с ЛК. Это также подтверждается значениями интегралов спектров, характеризующих не только полуширину, но и всю площадь под кривой спектрального распределения по всем уровням энергий. Как можно заметить, интеграл также в 2–3 раза меньше у светодиодного варианта светофора.

Пояснением к описанному может стать полная иллюстрация спектрального распределения некоторых светоблоков на основе ламп, представленная на рис. 9. Здесь видно, как работает светофильтр (кривая source test) линзового комплекта и как с его помощью из исходного спектра лампы (кривые base и source base) формируется необходимый спектр соответствующего цвета сигнала (кривая test).

Из сказанного следует очевидный вывод о том, что светодиодный светофор будет существенно выигрывать по верности восприятия цвета у ЛК с точки зрения спектрального состава излучения при прочих равных условиях. Однако полупроводниковые источники излучения значительно проигрывают в этой части характеристик при изменении температурных условий работы [5]. Изменение доминирующей длины волны более чем на 10 нм в требуемом диапазоне температур ($-60 \dots +55$ °C) может оказаться для желтого и красного сигнала неприемлемым. Эта проблема в данное время решается как

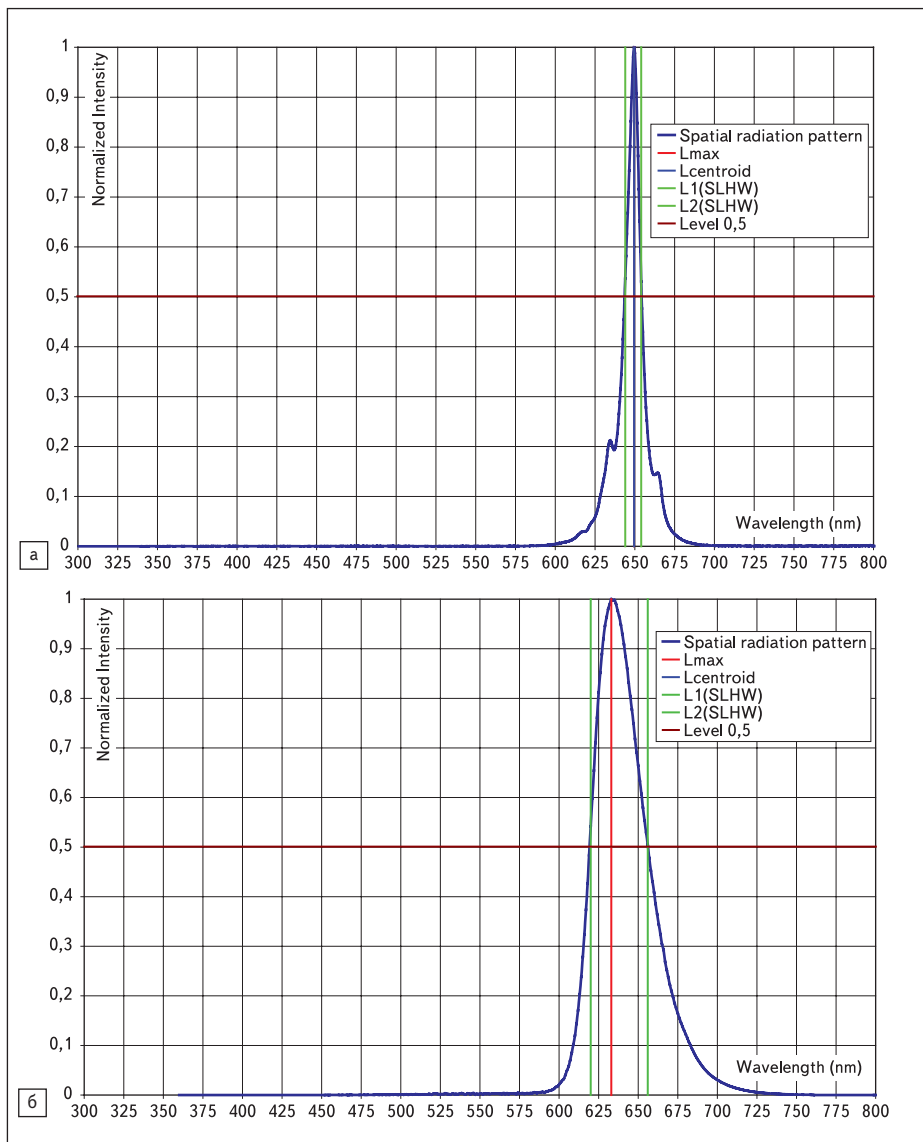


Рис. 8. Детализовка диаграмм спектрального распределения излучения красного светоблока ж/д светофора: а) на светодиодах; б) на ЛК

технически, так и законодательно: в первом случае разрабатываются средства обеспечения минимальных изменений параметров светодиодов, совершенствуются сами излучающие полупроводниковые структуры, а во втором — проводятся эксперименты по изменению существующих стандартов в части расширения границ цветности с учетом вышеупомянутых важных преимуществ в восприятии цвета.

Существующий на железной дороге ночной (питание светофора снижается на 25%) и маскировочный (1% значения силы света в дневном режиме) режимы работы светофоров являются хорошим примером, демонстрирующим преимущество динамических характеристик светодиодов. Ночной режим выполняется при напряжении питания 9–10,5 В переменного тока (номинальное напряжение — 12 В, 50 Гц). При понижении питания у лампы накаливания не только изменяется интенсивность излучения, но и на 300–400 К

снижается температура нити накала. Спектр излучения сдвигается в сторону длинных волн по закону Вина:

$$\lambda_{\max} = 0,002898/T, \quad (2)$$

где T — температура в Кельвинах, а λ_{\max} — длина волны с максимальной интенсивностью в метрах.

Происходит не только пропорциональное изменение амплитуды составляющих по всему спектру, но и нелинейное (из-за сдвига спектра) — особенно в области коротковолновых составляющих. Это приводит к существенному уменьшению исходных длин волн для формирования синего и зеленого (рис. 9) в ночное время, и, несмотря на увеличение чувствительности в этом диапазоне благодаря темновой адаптации и включению доминирования палочкового зрения, существенно ухудшает чистоту цвета: он становится «разбавленным», особенно зеленый. А в ус-

ловиях применения различных источников света для освещения станций (натриевые, ртутные лампы) сигналы светофоров можно спутать со светом этих ламп. Очевидно, что говорить о качестве цвета в маскировочном режиме вообще нет смысла. В то время как зависимость спектральных характеристик светодиодов от прямого тока выражается в нескольких нанометрах при изменении тока на 90%, и если система управления позволяет модулировать интенсивность излучения не питанием, например, ШИМ, как это с успехом используется в системах отображения информации, то изменение колориметрических характеристик будет полностью отсутствовать.

К показанным выше характеристикам светофоров, обобщив их, можно добавить следующие факторы, дополняющие объективную картину технического состояния светосигнальных устройств на светодиодах:

- наработка не менее 50 000 часов без обслуживания и значимого изменения характеристик;
- высокая механическая прочность;
- значительное снижение энергопотребления;
- отсутствие изменения характеристик в различных электрических режимах работы;
- существенное увеличение дальности и уменьшение времени верного восприятия цвета сигнала;
- значительное уменьшение времени включения сигнала светофора.

К следующим факторам можно отнести проблемы применения светодиодов:

- стыковка с существующей системой управления режимами, например, из-за низкого энергопотребления;
- изменение цветовых и характеристик и значений силы света при изменении температуры;
- чувствительность к воздействию наводок и импульсных помех;
- существенный катафотный эффект.

Подводя итог приведенным рассуждениям, можно сделать вывод о том, что применение светодиодов в светосигнальной аппаратуре имеет ряд проблем. Однако существенный совокупный качественный эффект, который непременно будет иметь место в случае применения светодиодов, оправдывает многие средства достижения этого эффекта. Его результатом станет максимальная безопасность движения автомобилей, поездов, кораблей и сохраненная жизнь человека, имеющая наивысшую ценность.

Черное тело белого светодиода, или Солнце из гетероперехода

Однако квазимонохромность с некоторого времени перестала быть отличительным и приоритетным качеством светодиодов. Полупроводниковые излучающие приборы внедрились в освещение и открыли доселе

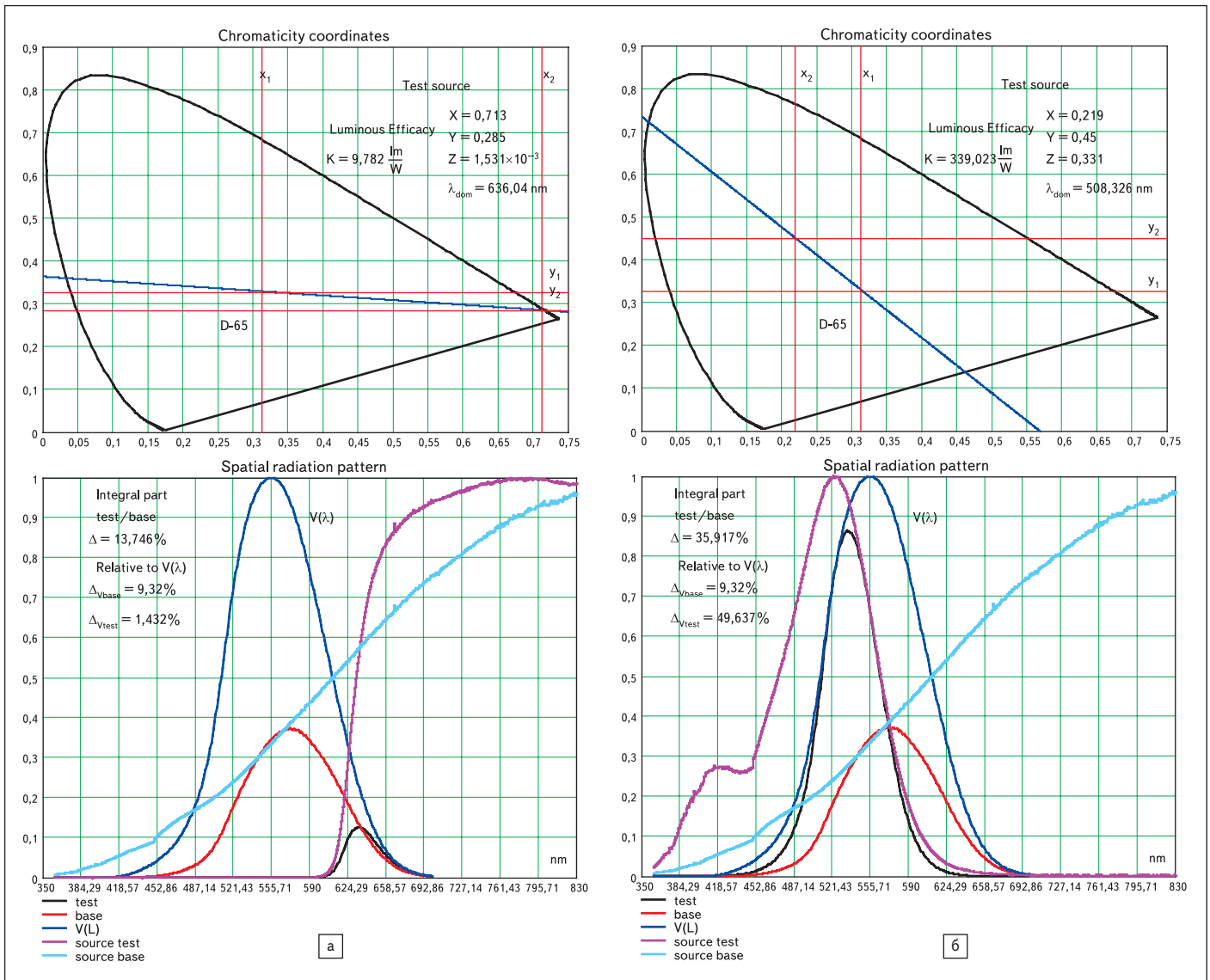


Рис. 9. Спектральные характеристики светоблоков светофоров на основе линзовых комплектов и механизм их формирования из исходного излучения ламп накаливания (координаты цветности и другие характеристики спектров приведены на сноских диаграмм): а) красный; б) зеленый

невидомый 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 глазом, то стоит снова обратиться к рис. 7 и сравнить спектральные составляющие излучения светодиодов на основе люминофора и используемых в освещении ламп: люминесцентных, накаливания и др. 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 годится лишь при условии привязки к стандартному источнику с близкой коррелированной цветовой температурой, что некорректно с таким нерав-

номерным спектральным распределением энергии, как, например, у люминесцентной лампы, явно не являющейся планковским источником, с которым должно происходить сравнение. Другими словами, индекс цветопередачи, как и координаты цветности, слишком «оторваны» от физического смысла излучения и, тем более, от физики восприятия его глазом. Поэтому предлагаем провести сравнение этих источников по интегральному со-

ставу энергий излучения в восьми участках видимого спектра, кстати, рекомендованных для этого ГОСТ 23198-94. Это обстоятельство позволит сопоставить все источники света при равных условиях.

Приведенные в таблице 5 значения следует трактовать так. За 100% взята условная энергия, ограниченная указанными диапазонами, которая имеется у кривой видности глаза $V(\lambda)$. Ниже помещаются соответствующие

Таблица 5. Отношение интегральных энергий различных диапазонов спектра относительно $V(\lambda)$

| Диазоны по ГОСТ 23198-94, нм | Отношение интегралов в диапазонах по $V(\lambda)$, % | | | | | | | |
|--------------------------------------|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 380–420 | 420–440 | 440–460 | 460–510 | 510–560 | 560–610 | 610–660 | 660–760 |
| Солнце в 14:00, июль, T = 6150 K | 68,82 | 68,66 | 82,66 | 89,30 | 94,90 | 93,72 | 88,58 | 83,62 |
| Лампа накаливания с T = 2560 K | 3,15 | 4,93 | 7,19 | 13,53 | 22,12 | 33,72 | 46,66 | 60,95 |
| Люминесцентная лампа с T = 2700 K | 0,53 | 5,32 | 0,42 | 1,50 | 6,44 | 3,37 | 13,61 | 0,91 |
| Люминесцентная лампа с T = 4000 K | 1,66 | 10,12 | 3,83 | 3,52 | 8,65 | 3,63 | 12,46 | 0,94 |
| Люминесцентная лампа с T = 6300 K | 0,84 | 5,17 | 0,34 | 1,43 | 6,19 | 3,31 | 13,68 | 0,89 |
| Металлогалогенная лампа с T = 6700 K | 13,17 | 9,36 | 6,78 | 6,66 | 11,08 | 6,62 | 5,75 | 5,61 |
| Белый светодиод с T = 3300 K | 2,12 | 28,10 | 83,29 | 35,81 | 73,66 | 95,26 | 87,74 | 46,14 |
| Белый светодиод с T = 6300 K | 3,67 | 47,10 | 75,49 | 22,89 | 50,95 | 48,64 | 28,73 | 10,94 |

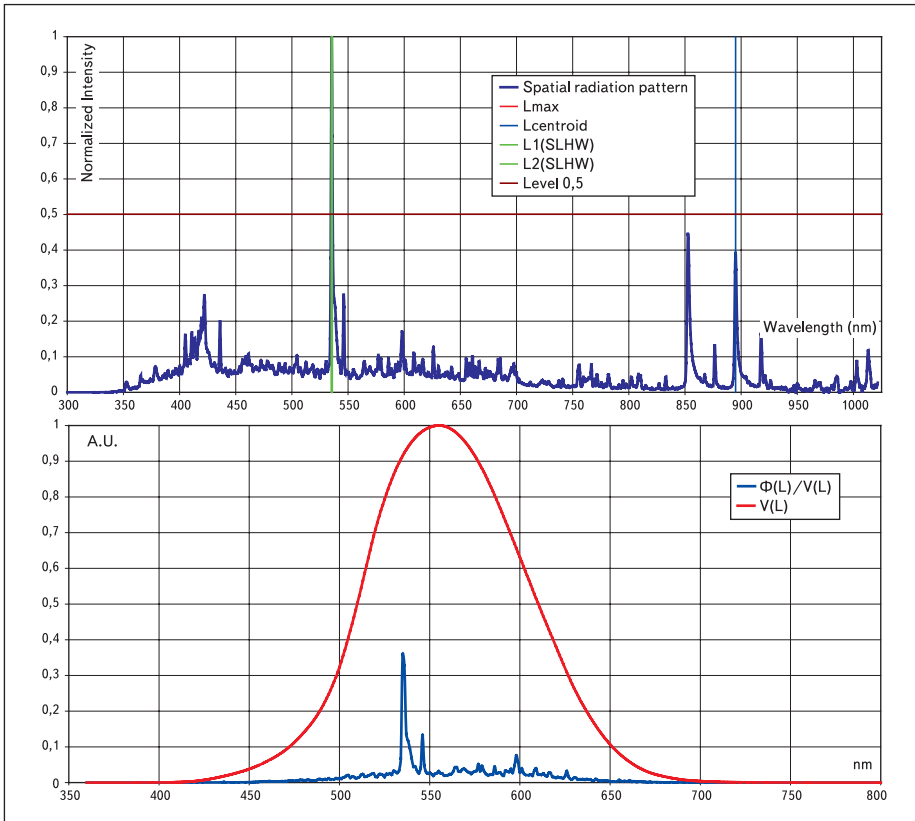


Рис. 10. Примеры характеристик спектрального распределения энергии (светового потока) некоторых источников излучения $E_a(\lambda)$ (каждой диаграмме распределения соответствует график функции $E_a(\lambda) \times V(\lambda)$, расположенный ниже ее): а) металлогалогенная лампа с $T = 6700$ K

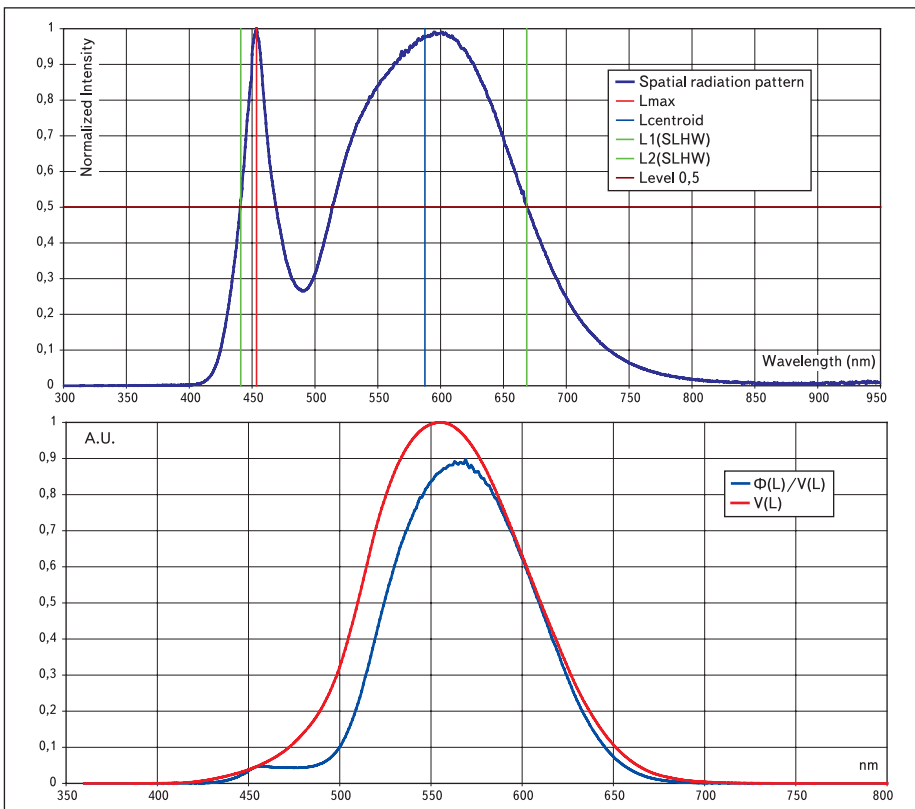


Рис. 10. Примеры характеристик спектрального распределения энергии (светового потока) некоторых источников излучения $E_a(\lambda)$ (каждой диаграмме распределения соответствует график функции $E_a(\lambda) \times V(\lambda)$, расположенный ниже ее): б) белый светодиод с $T = 3300$ K

условные энергии (интегралы под функциями относительного спектрального распределения плотности энергетической яркости) различных источников излучения, названия которых приведены в левом столбце, чьи спектры излучения 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 степени 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 способен увидеть глаз, и именно с нужной интенсивностью. Поэтому на всех участках видимого диапазона у такого света — высокий процент соответствия энергий $V(\lambda)$. Стоит отметить, что солнечный свет с более высокой цветовой температурой, чем приведено в таблице 5 (6500 K), 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 6.

Таблица 6. Отношение интегралов относительного спектрального распределения плотности энергетической яркости различных источников $E_a(\lambda)$ к интегралу $V(\lambda)$

| Типы источников излучения | Интеграл $E_a(\lambda) \times V(\lambda) d\lambda$ в % от $V(\lambda)$ |
|--|--|
| Солнце в 14:00, июль, $T = 6150$ K | 92,96 |
| Лампа накаливания с $T = 2560$ K | 28,55 |
| Люминесцентная лампа с $T = 2700$ K | 5,54 |
| Люминесцентная лампа с $T = 4000$ K | 6,64 |
| Люминесцентная лампа с $T = 6300$ K | 5,41 |
| Металлогалогенная лампа с $T = 6700$ K | 4,70 |
| Белый светодиод с $T = 3300$ K | 79,31 |
| Белый светодиод с $T = 6300$ K | 44,68 |

Однако обратим внимание и на другие источники. Лампа накаливания, например, «недобирает» практически половину диапазона, и эта информация была в более общей форме рассмотрена в предыдущих примерах с ж/д светофорами. Металлогалогенная лампа 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 состоит в очень узких пиках высокой интенсивности, вместе с тем обладающих малой интегральной энергией, что видно по данным таблицы 6. Такое же «положение дел» и у люминесцентных ламп, 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. 10.

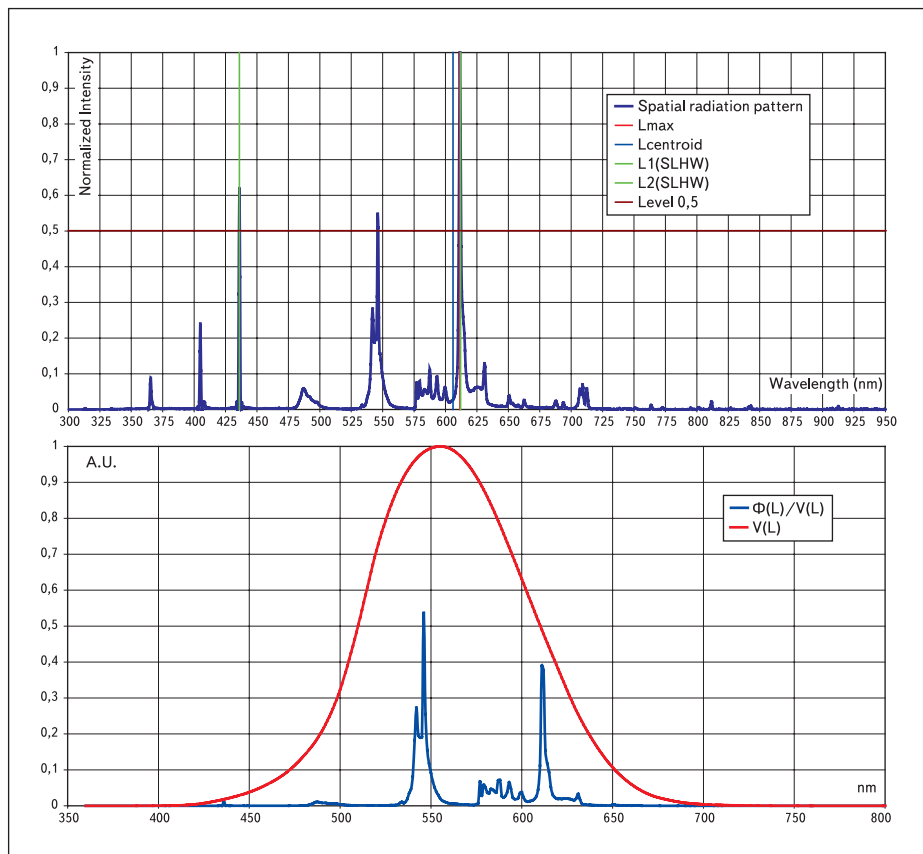


Рис. 10. Примеры характеристик спектрального распределения энергии (светового потока) некоторых источников излучения $E_a(\lambda)$ (каждой диаграмме распределения соответствует график функции $E_a(\lambda) \times V(\lambda)$, расположенный ниже ее): в) люминесцентная лампа с $T = 6300$ К

И 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 света. Судя по данным таблиц 5, 6 и рис. 10, спектр излучения белых светодиодов с различными коррелированными цветовыми температурами 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 в результате подобного исследования, 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 по комфортности восприятия глазным аппаратом, что открывает куда большие перспективы по его применению, чем когда-то были у ламп по сравнению со свечами и керосиновыми фонарями.

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) [13], как для дневного зрения (яркость около 100 кд/м^2), так и для темно-адаптированного (яркость менее $10\text{--}4 \text{ кд/м}^2$) 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, при которой доля энергии видимого излучения будет максимальной, то расчеты покажут, что энергия видимого излучения абсолютно черного тела с различной температурой — 2000, 4000,

Таблица 7. Доля энергии видимого излучения

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

6000, 8000, 12 000 К — составляет соответственно такую часть от полной энергии излучения, которая показана в таблице 7.

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 5 и 6, 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 [15]. Предположительно, они мало участвуют 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. NF, являясь, тем не менее, фоторецептором и имея свою спектральную чувствительность, 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, как видно по той же таблице 5, содержит значительную часть энергии излучения только у светодиодов, что делает их самыми перспективными источниками света и с учетом результатов приведенных исследований. Таким образом, очевидно, что освещение с насыщенным синне-зеленым участком спектра (480–500 нм) улучшает световое восприятие и повышает остроту зрения. Однако так как ранее предложенное объяснение этого факта было 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 фокусиров-

ки, — оптическое качество глаза (а не уровень освещенности). Острота зрения повышается с уменьшением размера зрачка, потому что отсекаются лучи с повышенной абберацией. Освещение с обогащенным синне-зеленым участком спектра или с повышенной цветовой температурой ламп эффективнее уменьшает размер зрачка, чем простое повышение уровня освещения, влекущее рост блёскости 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. Невзирая на истинный механизм 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. 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.
2. Технический доклад МКО «Измерения СИД» (Technical report “Measurement of LED’s” CIE127-1997 [ISBN 3 900 734 84 4]).
3. Никифоров С. Г. Теперь электроны можно увидеть: светодиоды делают электрический ток очень заметным // Компоненты и технологии. 2006. № 3.
4. Никифоров С. Г., Сушков В. П. Метод контроля потенциальной степени деградации характеристик светодиодов на основе твердых растворов AlGaInN // Доклад на конференции «Нитриды галлия и алюминия», МГУ, январь 2007.
5. Никифоров С. Г. Температура в жизни и работе светодиодов // Компоненты и технологии. 2005. № 9. 2006. № 1.
6. Agaphonov D., Murashova M., Nikiphorov S., Pinchuk O, Stolyarevskaya R. Red Led Railway Traffic Lights Visual Perception Research // CIE session 2003, San Diego. Proceedings, volume 2.
7. Agafonov D. R., Anikin P. P, Nikiforov S. G. On Design and Manufacturing of Led and Systems Based on Led // Light and engineering. Volume 11, Number 1, 2003.
8. ГОСТ 25695-91. Светофоры дорожные. Типы. Основные параметры.
9. ГОСТ 24179-80. Светофильтры, светофильтры-линзы, линзы, рассеиватели и отклоняющие вставки стеклянные для сигнальных приборов железнодорожного транспорта. Технические условия.
10. Официальные рекомендации Международной комиссии по освещению (МКО), публикация МКО № 2.2 (ТС-1.6). Цвета световых сигналов. 1975.
11. Хацевич Т. Н.. Физиологическая оптика / Уч. пособие. Ч. 1. Новосибирск: СГГА, 1998.
12. Хьюбел Д. Глаз, мозг, зрение // Пер. с англ. М.: Мир, 1990.
13. Джадд Д., Вышецки Г. Цвет в науке и технике. М.: Мир, 1978.
14. Физиология сенсорных систем: Ч. 1. Физиология зрения. Л.: Наука, 1971.
15. Берман С. М., Клиер Р. Д. Недавно открытый фоторецептор человека и предыдущие исследования в области зрения // Светотехника. 2008. № 3.