

# Радиооптика

Сетевое научное издание  
МГТУ им. Н.Э. Баумана

<http://radiooptics.ru>

Ссылка на статью:

// Радиооптика. МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
Электрон. журн. 2016. № 06. С. 64–74.

DOI: **10.7463/rdopt.0616.0852322**

Представлена в редакцию: 04.10.2016

Исправлена: 18.10.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 535.625.3+628.9.041

## Световая эффективность светодиодных источников белого излучения

Павлов В. Ю.<sup>1</sup>, Пясецкий В. Б.<sup>1</sup>,

[\\*ashirankov@mail.ru](mailto:ashirankov@mail.ru)

Хорохоров А. М.<sup>1</sup>, Ширанков А. Ф.<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

---

Проведён анализ световой эффективности светодиодных источников белого излучения. Приведена методика расчёта световой эффективности для светодиодных кластеров, состоящих из 2-х, 3-х и произвольного числа  $n$  квазимонохроматических источников излучения.

**Ключевые слова:** белое излучение, светодиод, светодиодная осветительная система, световая эффективность

---

### Введение

Для решения многих практических задач, связанных с применением искусственных осветительных систем, требуются источники белого света. К таким источникам предъявляется ряд требований: экономичность, безопасность, приемлемые массогабаритные параметры для рациональных конструкторских решений осветительных систем, а также длительный срок службы. Светоизлучающие диоды (СИД) имеют ряд преимуществ перед такими экономичными источниками белого света, как люминесцентные и галогенные лампы: их отличает простота монтажа и обслуживания, более высокая световая эффективность при малых габаритах, отсутствие высокотоксичных веществ и материалов, относительно низкая рабочая температура, низкое рабочее напряжение, устойчивость к механическим нагрузкам, большой срок службы, а также возможность управления световым потоком посредством широтно-импульсной модуляции силы питающего тока (диммирование) [1, 2].

Вопрос о световой эффективности СИД является основным при оценке экономичности светодиодных осветительных систем (см., например, [3-7]). Поскольку СИД по сути являются источниками квазимонохроматического излучения, то в осветительных системах используются не собственно СИД, а светодиодные устройства, представляющие собой источники белого (или близкого к белому) излучения [8-10]:

- фотолюминесцентные СИД коротковолнового излучения с люминофорным покрытием: голубого излучения ( $B$ ) с двухкомпонентным красно-зелёным ( $RG$ ) люминофором, эквивалентные им голубого ( $B$ ) излучения с жёлтым ( $Y$ ) люминофором, а также ультрафиолетового излучения с трёхкомпонентным (и более) красно-зелёно-синим ( $RGB$ ) люминофором;
- группы цветных красно-зелёно-синих СИД ( $RGB$ -кластеры).

Световая эффективность фотолюминесцентных СИД может быть определена по техническим описаниям, предоставляемым фирмами-производителями таких СИД. Типичными являются оценки световой эффективности от 80 до 120 лм/Вт (см., например, [8]).

Целью настоящей статьи является анализ световой эффективности «белых» светодиодных осветительных систем, состоящих из 3-х, 2-х или произвольного числа  $n$  квазимонохроматических цветных источников, на основе стандартной методики расчёта световой эффективности.

## 1. Связь между цветовыми, световыми и энергетическими характеристиками оптического излучения

В колориметрической системе  $CIE\ RGB\ 1931$  любой цвет, в том числе белый, может быть выражен тремя линейно независимыми цветами, называемыми основными [11]. В качестве основных цветов приняты монохроматические излучения: красное  $R$  ( $\lambda_R = 700$  нм), зелёное  $G$  ( $\lambda_G = 546,1$  нм), синее  $B$  ( $\lambda_B = 435,8$  нм). Для получения белого света соотношение световых потоков [лм] или яркостей излучения [ $\text{кд}/\text{м}^2$ ] основных цветов должно быть следующим:

$$F_R : F_G : F_B = 680 : 3121 : 41 \approx 1 : 4,5907 : 0,0601.$$

Это же соотношение может быть выражено в энергетических величинах [Вт]:

$$F_{Re} : F_{Ge} : F_{Be} = 243,9 : 4,66 : 3,38.$$

Основные цвета  $R$ ,  $G$  и  $B$ , взятые при указанных соотношениях потоков монохроматических излучений, называются единичными основными цветами, а любой цвет может быть выражен соотношением:

$$C = r'R + g'G + b'B,$$

где  $r'$ ,  $g'$ ,  $b'$  – коэффициенты цвета – величины, определяющие количество единичных основных цветов для получения цвета  $C$ .

Величину

$$m = r' + g' + b'$$

называют цветовым модулем, а нормированные на модуль коэффициенты цвета называются коэффициентами (координатами) цветности:

$$r = \frac{r'}{m}, \quad g = \frac{g'}{m}, \quad b = \frac{b'}{m}.$$

В частности, для белого цвета  $E$ :  $r' = g' = b' = 1$  и  $r = g = b = 1/3$ .

Стандарт *CIE RGB* 1931 определяет функции сложения цветов  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$ ,  $\bar{b}(\lambda)$ , представляющие собой координаты цветности, необходимые для получения монохроматического излучения единичной мощности с длиной волны  $\lambda$  (рис. 1).

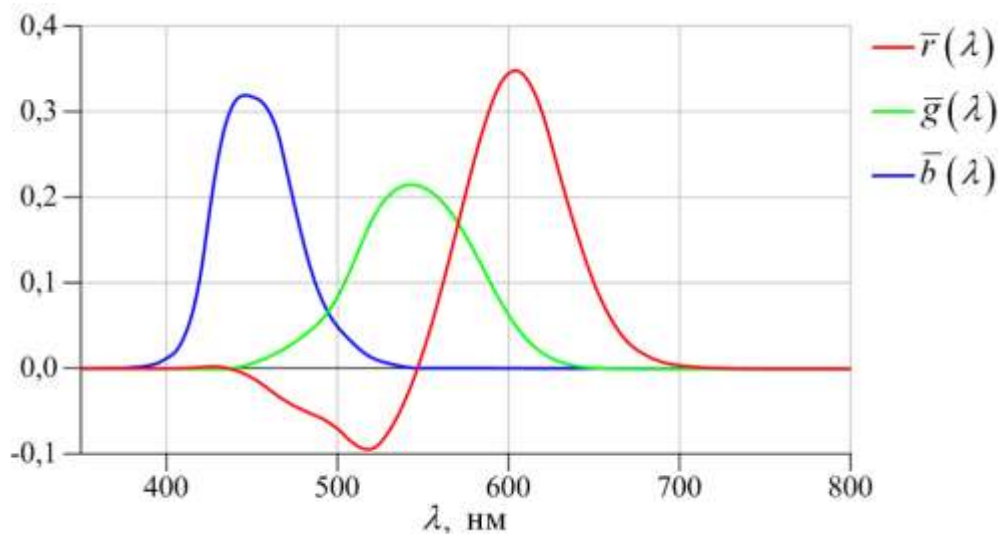


Рис. 1. Кривые сложения цветов *RGB CIE* 1931

Более универсальная колориметрическая система *CIE XYZ* 1931 представляет соответствующие функции сложения цветов  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  и  $\bar{z}(\lambda)$  (рис.2).

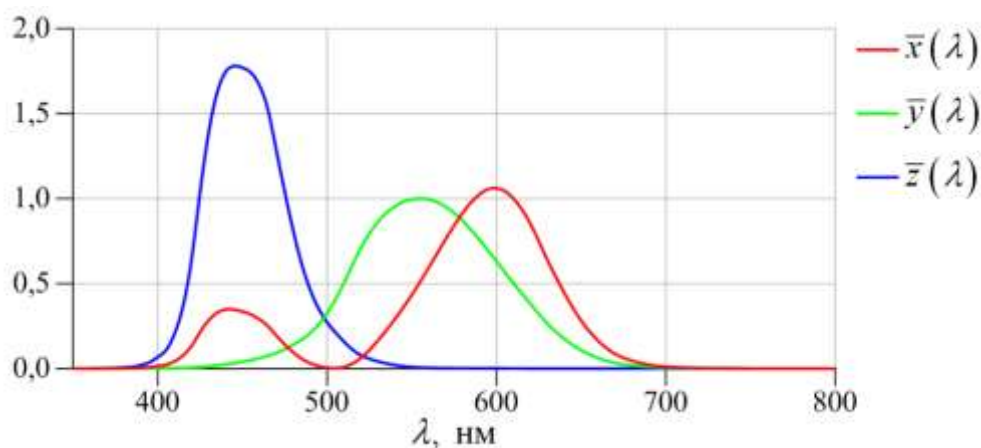


Рис. 2. Кривые сложения цветов *XYZ CIE* 1931

Функция  $\bar{y}(\lambda) \equiv V(\lambda)$ , где  $V(\lambda)$  – относительная функция спектральной световой эффективности излучения, или относительная спектральная чувствительность зрительной системы человека, соответствующего понятию «стандартный фотометрический наблюдатель» *CIE* 1924 и «стандартный колориметрический наблюдатель» *CIE* 1931. Все возможные цветности формируют палитру человеческого зрения, ограниченную кривой, называемой спектральным локусом и определяющей координаты цветности всех видимых монохроматических излучений (рис. 3).

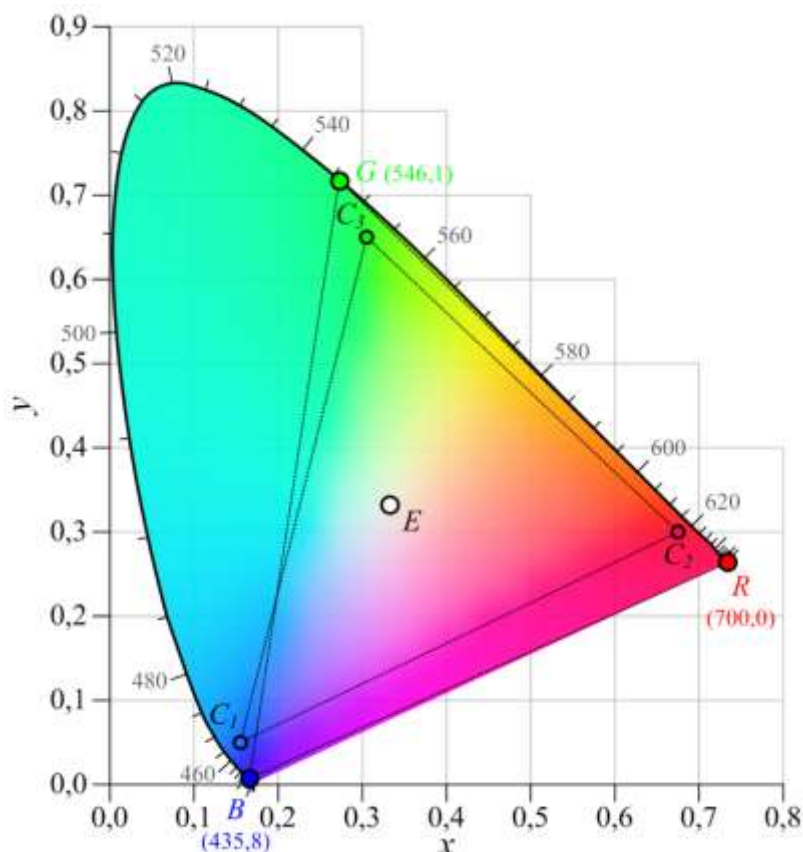


Рис. 3. Диаграмма цветности  $x, y$  CIE 1931

Следует отметить, что функция  $V(\lambda)$  CIE 1931 года определена для условий наблюдения цветных предметов с угловым размером  $2^\circ$ . В 1964 году Международная комиссия по освещению (МКО) приняла дополнительную модель стандартного колориметрического наблюдателя для условий наблюдения цветных предметов с угловым размером  $10^\circ$ .

## 2. Расчёт световой эффективности осветительных систем на базе 3-х цветных СИД

Светодиодный кластер белого излучения на основе трёх СИД с излучениями линейно независимых цветов является реализацией теоретического представления трёхмерности любого, в том числе белого, цвета. При расчёте осветительных систем на базе трёх квазимонохроматических СИД основное внимание должно быть обращено на то, чтобы при смешении выбранных цветов  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$  можно было получить белый цвет  $E$  с заданными координатами цветности. Это означает, что точка  $E(x_E, y_E)$  должна находиться внутри треугольника, образованного точками  $C_1(x_1, y_1)$ ,  $C_2(x_2, y_2)$  и  $C_3(x_3, y_3)$  (рис. 3).

Если нормированные спектральные плотности излучения СИД равны  $L_1(\lambda)$ ,  $L_2(\lambda)$ ,  $L_3(\lambda)$ , то, по определению, соответствующие яркости единичных цветов будут равны:

$$\begin{aligned}
F_R &= f_1 L_{1r} + f_2 L_{2r} + f_3 L_{3r}, \\
F_G &= f_1 L_{1g} + f_2 L_{2g} + f_3 L_{3g}, \\
F_B &= f_1 L_{1b} + f_2 L_{2b} + f_3 L_{3b}
\end{aligned}$$

или в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} F_R \\ F_G \\ F_B \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} L_{1r} & L_{2r} & L_{3r} \\ L_{1g} & L_{2g} & L_{3g} \\ L_{1b} & L_{2b} & L_{3b} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $f_1, f_2, f_3$  – коэффициенты, пропорциональные световым потокам цветов  $C_1, C_2, C_3$ ;  $L_{ir}, L_{ig}, L_{ib}$  – величины, характеризующие взаимное положение спектров источников и функций сложения цветов:

$$L_{ir} = \int L_i(\lambda) \bar{r}'(\lambda) d\lambda, \quad L_{ig} = \int L_i(\lambda) \bar{g}'(\lambda) d\lambda, \quad L_{ib} = \int L_i(\lambda) \bar{b}'(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

$i = 1, 2, 3$ .

В формулах (2) функции  $\bar{r}'(\lambda), \bar{g}'(\lambda)$  и  $\bar{b}'(\lambda)$  представляют собой функции сложения цветов, умноженные на коэффициенты перевода энергетических величин к цветностям, а именно:

$$\bar{r}'(\lambda) = 243,9 \bar{r}(\lambda), \quad \bar{g}'(\lambda) = 4,66 \bar{g}(\lambda), \quad \bar{b}'(\lambda) = 3,88 \bar{b}(\lambda).$$

Если в системе уравнений (1) принять установленные соотношения для единичных цветов, т.е.  $F_R = 1, F_G = 4,5907, F_B = 0,0601$ , то коэффициенты  $f_1, f_2, f_3$  легко находятся методом (правилом) Крамера:

$$f_i = \frac{\Delta_i}{\Delta}, \quad (3)$$

где  $\Delta = \begin{bmatrix} L_{1r} & L_{2r} & L_{3r} \\ L_{1g} & L_{2g} & L_{3g} \\ L_{1b} & L_{2b} & L_{3b} \end{bmatrix}$  – главный определитель системы;  $\Delta_i$  – определитель вида  $\Delta$ , в

котором  $i$ -ый столбец заменён соответственно на столбец величин  $F_R, F_G, F_B$ .

Найденные значения  $f_1, f_2$  и  $f_3$  представляют собой, по существу, искомые единичные световые потоки для триады цветов  $C_1, C_2, C_3$ . Общий световой поток  $\Phi$  пропорционален сумме единичных световых потоков:

$$\Phi \sim f_1 + f_2 + f_3, \quad (4)$$

а общая мощность, потребляемая осветительной системой, пропорциональна сумме мощностей, потребляемой каждым цветным СИД при излучении единичного потока:

$$P \sim \frac{f_1}{K_1} + \frac{f_2}{K_2} + \frac{f_3}{K_3}, \quad (5)$$

где  $K_1, K_2, K_3$  – световые эффективности цветных светодиодов ( $C_1, C_2, C_3$ ).

Световая эффективность осветительной системы на базе трёх цветных СИД определяется на основе соотношений (4) и (5) по формуле:

$$K = \frac{\Phi}{P} = \frac{K_1 K_2 K_3 (f_1 + f_2 + f_3)}{f_1 K_2 K_3 + f_2 K_1 K_3 + f_3 K_1 K_2}. \quad (6)$$

Если излучения источников  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  монохроматические, то вычисление коэффициентов  $L_{ir}$ ,  $L_{ig}$ ,  $L_{ib}$  значительно упрощается. В частности для источников основных цветов красного  $R$  ( $\lambda_R = 700$  нм), зелёного  $G$  ( $\lambda_G = 546,1$  нм), синего  $B$  ( $\lambda_B = 435,8$  нм) коэффициенты принимают значения:

$$L_{2r} = L_{3r} = L_{1g} = L_{3g} = L_{1b} = L_{2b} = 0, \\ L_{1r} = 243,9 \cdot 0,0041 \approx 1, \quad L_{2g} = 4,66 \cdot 0,214 \approx 1, \quad L_{3b} = 3,38 \cdot 0,295 \approx 1,$$

и, следовательно, из (3) получается:

$$f_1 = F_R = 1, \quad f_2 = F_G = 4,5907, \quad f_3 = F_B = 0,0601.$$

При известных значениях световой эффективности  $R$ ,  $G$  и  $B$  СИД (60, 130, 30 лм/Вт, соответственно) общая световая эффективность согласно (6) составит примерно 105 лм/Вт, что несколько меньше световой эффективности «белых» СИД с люминофором. Вместе с тем, если в качестве зелёного СИД использовать фотолюминесцентный с люминофором, преобразующим синий свет в зелёный (световая эффективность такого СИД может достигать значения 380 лм/Вт [12]), то общая световая эффективность светодиодного кластера увеличится почти в два раза до примерно 185 лм/Вт.

### 3. Расчёт световой эффективности осветительных систем на базе 2-х цветных СИД

Достоинством «белого» кластера на основе трёх СИД можно считать возможность коррекции цветности белого излучения через независимое управление световым потоком любого из трёх СИД, составляющих кластер. В некоторых случаях, когда такая коррекция не является необходимой, возможна техническая реализация кластера белого излучения на основе двух СИД. В этом случае цветности излучений двух СИД должны быть взаимно-дополнительными: при расчёте осветительных систем на базе двух квазимонохроматических СИД основное внимание должно быть обращено на то, чтобы при смешении выбранных цветов  $C_1$  и  $C_2$  можно было получить белый цвет  $E$  с заданными координатами цветности. Это означает, что точки  $C_1(r_1, g_1)$ ,  $C_2(r_2, g_2)$   $E(r_E, g_E)$  (рис. 4) должны находиться на одной прямой линии, и их координаты цветности связаны соотношением:

$$\frac{r_E - r_1}{r_2 - r_1} = \frac{g_E - g_1}{g_2 - g_1}.$$

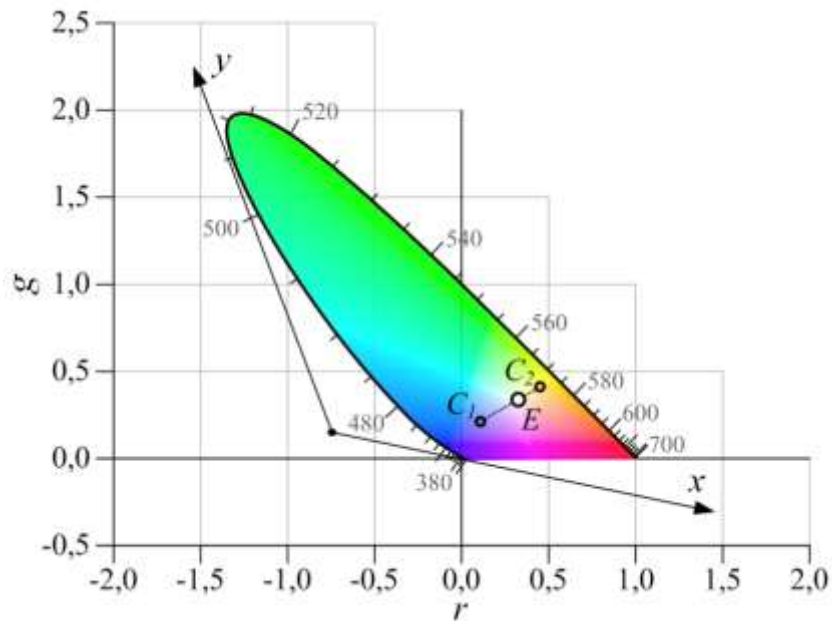


Рис. 4. Диаграмма цветности  $rb CIE$

Световые потоки СИД должны быть обратно пропорциональны длинам отрезков  $C_1E$  и  $EC_2$ , т.е.

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{\sqrt{(r_2 - r_E)^2 + 4,5907^2 \cdot (g_2 - g_E)^2}}{\sqrt{(r_1 - r_E)^2 + 4,5907^2 \cdot (g_1 - g_E)^2}}, \quad (7)$$

где коэффициент  $4,5907^2$  характеризует переход от коэффициентов цветности источников  $C_1$  и  $C_2$  к их световым потокам.

Таким образом, формула для световой эффективности осветительной системы на базе двух цветных СИД, полученная из (6) при условии  $f_3 = 0$ , будет иметь следующий вид:

$$K = \frac{\Phi}{P} = \frac{K_1 K_2 (f_2 + f_1)}{K_1 f_2 + K_2 f_1} = \frac{K_1 K_2 \left(1 + \frac{f_1}{f_2}\right)}{K_1 + K_2 \frac{f_1}{f_2}}, \quad (8)$$

где отношение  $\frac{f_1}{f_2}$  определяется по формуле (7).

#### 4. Расчёт световой эффективности осветительных систем на базе $n$ цветных СИД

Недостатком двухцветных кластеров является ограниченная возможность управления цветностью суммарного излучения. Теоретически при изменении потоков излучения двух СИД точка цветности суммарного их излучения лежит на прямом отрезке  $C_1C_2$ , ко-



торый может не включать в себя точку белого цвета  $E$ , например, изначально вследствие случайных вариаций цветностей СИД, возникающих при их изготовлении, или в процессе эксплуатации в связи с изменениями режима работы (температуры и напряжения питания). В этом отношении кластеры на основе трёх СИД выглядят предпочтительнее. Ещё большими возможностями в отношении цветовой коррекции могут обладать кластеры с числом СИД более трёх. Световая эффективность кластеров с числом СИД, равным  $n$ , на основе уравнений (4) – (6) может быть представлена как

$$K = \frac{\Phi}{P} = \frac{K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \dots \cdot K_n \cdot (f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_n)}{f_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \dots \cdot K_n + f_2 \cdot K_1 \cdot K_3 \cdot \dots \cdot K_n + \dots + f_n \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_{n-1}} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i}{\sum_{i=1}^n \frac{f_i}{K_i}}$$

Дополнительным преимуществом многоцветных кластеров является их более широкий цветовой охват по сравнению с трёхцветными. Это даёт большие возможности как для коррекции цветности суммарного белого излучения (его цветовой температуры), так и для применения таких кластеров в цветодинамических системах, в частности, для цветных дисплеев с широким цветовым охватом.

## Заключение

Представленные в данной работе результаты анализа световой эффективности светодиодных источников белого света (светодиодных «белых» кластеров) позволяют сделать вывод о возможности их эффективного применения в задачах создания светодиодных осветительных систем. Рассмотренная в статье методика позволяет рассчитать световую эффективность осветительных систем на базе светодиодных кластеров, состоящих из произвольного числа цветных СИД.

## Список литературы

1. Performance of Halogen Incandescent MR16 Lamps and LED Replacements. Caliper Benchmark Report. November 2008. Режим доступа: <https://www.led-professional.com/resources-1/led-reports-roadmaps/doe-report-releases-two-new-caliper-benchmark-reports> (дата обращения: 23.11.2016).
2. Performance of T12 and T8 Fluorescent Lamps and Troffers and LED Linear Replacement Lamps. Caliper Benchmark Report. January 2009. Режим доступа: [http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical\\_reports/PNNL-18076.pdf](http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-18076.pdf) (дата обращения: 23.11.2016).
3. Барышников Н.В., Мазалов В.В., Ширанков А.Ф., Павлов В.Ю., Сафонов П.И. Разработка новых критериев эффективности дорожных светодиодных светильников // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. №7. DOI: [10.7463/0713.0579034](https://doi.org/10.7463/0713.0579034)



4. LED lighting and control systems evolve for optimal efficacy. LEDs Magazine, July/August 2011. Режим доступа: <http://www.ledsmagazine.com/articles/2011/07/led-lighting-and-control-systems-evolve-for-optimal-efficiency-magazine.html> (дата обращения: 23.11.2016).
5. Hordeski Michael F. New Technologies for Energy Efficiency. Fairmont Prerss. 2003. 376 p.
6. Perry Jeff. Designing LED Lighting Systems For Optimal Light Output. National Semiconductor. Power Electronics. Jan 1, 2011. Режим доступа: <http://powerelectronics.com/lighting/designing-led-lighting-systems-optimal-light-output> (дата обращения: 23.11.2016).
7. Comparing White Light LEDs to Conventional Light Sources. U.S. Department of Energy's Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. 2008. Режим доступа: [http://cool.conservation-us.org/byorg/us-doe/comparing\\_white\\_leds.pdf](http://cool.conservation-us.org/byorg/us-doe/comparing_white_leds.pdf) (дата обращения: 23.11.2016).
8. CITIZEN ELECTRONICS CO., LTD. Режим доступа: [http://ce.citizen.co.jp/lighting\\_led/en/index.html](http://ce.citizen.co.jp/lighting_led/en/index.html) (дата обращения: 23.11.2016).
9. OSRAM Opto Semiconductors. Режим доступа: [http://www.osram-os.com/0osram\\_os/ru/index.jsp](http://www.osram-os.com/0osram_os/ru/index.jsp) (дата обращения: 23.11.2016).
10. Philips Lumileds Lighting Company. Режим доступа: <http://www.philipslumileds.com> (дата обращения: 23.11.2016).
11. Colorimetry: Understanding the CIE System. Edited by Janos Schanda. John Wiley & Sons, Inc. 2007. 467 p.
12. Details of the 200lm/W TLED lighting technology breakthrough unraveled // Philips Lumileds Lighting Company. Режим доступа: [http://www.newscenter.philips.com/pwc\\_nc/main/shared/assets/nl/Newscenter/2013/LED-Lamp/Technical-backgrounder-lumen-per-watt-new.pdf](http://www.newscenter.philips.com/pwc_nc/main/shared/assets/nl/Newscenter/2013/LED-Lamp/Technical-backgrounder-lumen-per-watt-new.pdf) (дата обращения: 23.11.2016).

## Luminous Efficacy of LED White Light Sources

V.Yu. Pavlov<sup>1</sup>, V.B. Pyasetskiy<sup>1</sup>,

[\\*ashirankov@mail.ru](mailto:ashirankov@mail.ru)

A.M. Horohorov<sup>1</sup>, A.F. Shirankov<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

---

**Keywords:** white light, LED, LED lighting system, luminous efficacy

---

When creating the lighting systems of various types an estimate of the luminous efficacy of semiconductor white light sources is a relevant issue. A preliminary analysis shows that two types of light emitting diodes (LEDs) can be used as such sources: photo-luminescent LEDs and sets (clusters) of quasi-monochromatic LEDs. Manufacturers show the luminous efficacy of photo-luminescent LEDs in the technical documentation.

The goal is to elaborate a calculation technique to estimate the luminous efficacy of LED “white” light sources as the sets (clusters) of quasi-monochromatic LEDs. This goal is set because there is no such a technique. In addition, the analysis of practical problems shows that the LED clusters are of interest not only as the white light sources, but also as the light sources with color control.

The paper presents the technique to calculate the luminous efficacy based on the relationship between photometric and color parameters as applied to the sets of quasi-monochromatic sources. Gives the calculation technique and relationships for the luminous efficacy of “white” clusters consisting of 2, 3, and an arbitrary number  $n$  of quasi-monochromatic LEDs. These results were used to conduct comparative analysis of the luminous efficacy of photo-luminescent LEDs and LED clusters as the sources of “white” light. It is shown that the luminous efficacy of LED clusters corresponds to the maximum efficacy of modern photo-luminescent LEDs. It is substantiated that LED clusters have a number of advantages over photo-luminescent LEDs, such as capability to correct chromaticity of white light (its color temperature), to control chromaticity, and to use LED clusters in color dynamic systems, especially for color displays with a wide color gamut. The relationships obtained can be used in power calculations of LED-based lighting systems.

### References

1. Performance of Halogen Incandescent MR16 Lamps and LED Replacements. *Caliper Benchmark Report*. November 2008. Available at: <https://www.led-professional.com/resources-1/led->

- [reports-roadmaps/doe-report-releases-two-new-caliper-benchmark-reports](#), accessed 23.11.2016.
2. Performance of T12 and T8 Fluorescent Lamps and Troffers and LED Linear Replacement Lamps. *Caliper Benchmark Report*. January 2009. Available at: [http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical\\_reports/PNNL-18076.pdf](http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-18076.pdf), accessed 23.11.2016.
  3. Baryshnikov N.V., Mazalov V.V., Shirankov A.F., Pavlov V.Yu., Safonov P.I. Developing new criteria of efficiency for road LED luminaires. *Nauka i obrazovanie = Science and education*. Electronic scientific and technical publication. 2013, no. 7, pp. 319-328. DOI: [10.7463/0713.0579034](https://doi.org/10.7463/0713.0579034) [In Russian]
  4. LED lighting and control systems evolve for optimal efficacy. *LEDs Magazine*, July/August 2011. Available at: <http://www.ledsmagazine.com/articles/2011/07/led-lighting-and-control-systems-evolve-for-optimal-eficiency-magazine.html>, accessed 23.11.2016.
  5. Hordeski Michael F. New Technologies for Energy Efficiency. *Fairmont Press*. 2003. 376 p.
  6. Perry Jeff. Designing LED Lighting Systems For Optimal Light Output. *National Semiconductor. Power Electronics*. Jan 1, 2011. Available at: <http://powerelectronics.com/lighting/designing-led-lighting-systems-optimal-light-output>, accessed 23.11.2016.
  7. Comparing White Light LEDs to Conventional Light Sources. *U.S. Department of Energy's Office of Energy Efficiency and Renewable Energy*. 2008. Available at: [http://cool.conservation-us.org/byorg/us-doe/comparing\\_white\\_leds.pdf](http://cool.conservation-us.org/byorg/us-doe/comparing_white_leds.pdf), accessed 23.11.2016.
  8. CITIZEN ELECTRONICS CO., LTD. Available at: [http://ce.citizen.co.jp/lighting\\_led/en/index.html](http://ce.citizen.co.jp/lighting_led/en/index.html), accessed 23.11.2016.
  9. OSRAM Opto Semiconductors. Available at: [http://www.osram-os.com/osram\\_os/ru/index.jsp](http://www.osram-os.com/osram_os/ru/index.jsp), accessed 23.11.2016.
  10. Philips Lumileds Lighting Company. Available at: <http://www.philipslumileds.com>, accessed 23.11.2016.
  11. Colorimetry: Understanding the CIE System. Edited by Janos Schanda. *John Wiley & Sons, Inc*. 2007. 467 p.
  12. Details of the 200lm/W TLED lighting technology breakthrough unraveled. *Philips Lumileds Lighting Company*. Available at: [http://www.newscenter.philips.com/pwc\\_nc/main/shared/assets/nl/Newscenter/2013/LED-Lamp/Technical-backgrounder-lumen-per-watt-new.pdf](http://www.newscenter.philips.com/pwc_nc/main/shared/assets/nl/Newscenter/2013/LED-Lamp/Technical-backgrounder-lumen-per-watt-new.pdf), accessed 23.11.2016.