

# СВЕТО 6·2007

# ТЕХНИКА



# Моделирование зависимости освещенности, создаваемой светодиодом, от расстояния

Э. ИКОНЕН, П. КЭРХЭ, П. МАННИНЕН<sup>1</sup>

Институт метрологических исследований, Технологический университет Хельсинки, Центр метрологии и аккредитации, Финляндия

Определение условий измерений оптических параметров светодиодов (СД) продолжает оставаться одним из центральных моментов работы некоторых технических комитетов МКО. В [1, 2] представлены методы измерения положения СД для надежного определения их силы света. Однако они предполагают необходимость точного знания радиуса излучающей зоны СД. Другая возможность – рассматривать СД просто как точечный источник света (ИС). Настоящая статья посвящена рассмотрению некоторых ограничений обычного анализа с использованием модели точечного ИС и представлению улучшенного метода [3], который может использоваться для определения освещенности на разных расстояниях от СД. Данный метод тесно связан с ранее проведенным анализом зависимости уровня сигнала от расстояния для фотометров [4] и спектрорадиометров [5–7], снабжённых диффузорами.

Для расчета освещенности от СД на любом расстоянии данный метод использует двухапертурную модель с протяженным ИС и приемником излучения (ПИ). В нём описывается перенос энергии между двумя параллельными круглыми пластинами, центрированными по оптической оси измерительной системы. Метод позволяет также вычислять существенно неламбертовское направленное угловое распределение силы света СД. В данной статье впервые представлены детали вывода уравнений модели метода. Поведение освещенности от СД опреде-

ляется его осевой силой света, фотометрическим телом, радиусом и местоположением светящего тела. Параметры модели могут быть определены из измерений освещенности на различных расстояниях от СД.

При приложении данного метода вместо метода по модели точечного ИС к результатам измерений статистический разброс зависимости наблюдаемой силы света СД от расстояния, доходивший до 50 %, снизился до менее чем 1 % для всех семнадцати типов испытанных СД [3]. Более того, в статье показывается, что во многих случаях может использоваться упрощенный метод, который ведет к значительному упрощению и облегчению соответствующих экспериментов и одновременно обеспечивает результатам достаточную надежность. Анализ результатов приводит к заключению, что для расчетов освещенности от СД в широком диапазоне расстояний может использоваться точно определённая осевая сила света СД.

**Ограничения анализа по модели точечного источника света.** На разных расстояниях  $d$  были определены осевые силы света  $I_v$  семнадцати разных типов СД. Сначала было предположено, что измеренные освещенности  $E_v(d)$  подчиняются закону обратного квадрата расстояния по модели точечного ИС,

$$E_v(d) = \frac{I_{v, \text{tip/chip}}}{(d + \Delta d)^2}, \quad (1)$$

при отсчёте расстояния от двух опорных плоскостей, проходящих, например, через передний конец СД («tip») (сдвиг  $\Delta d = 0$ ) и местоположение кристалла («chip») ( $\Delta d > 0$ ) СД. В анализе наблюдается четкая зависимость получаемых сил света от расстояния от двух этих опорных плоскостей ( $I_{v, \text{tip}}$  и  $I_{v, \text{chip}}$  соответственно). Далее было позволено произвольно («free») меняться положению  $\Delta d$  опорной плоскости, но и в этом случае все ещё более половины испытываемых типов СД демонстрировали соответствующие зависимости силы света ( $I_{v, \text{free}}$ ) от расстояния. Соответствующие результаты для двух типов СД показаны на рис. 1. Эти результаты не были удовлетворительны из-за необходимости большого числа измерений для получения описания полного распределения освещенности от СД.

<sup>1</sup> E-mail: erkki.ikonen@mikes.fi  
Перевод с англ. Е.Т. Алиева.

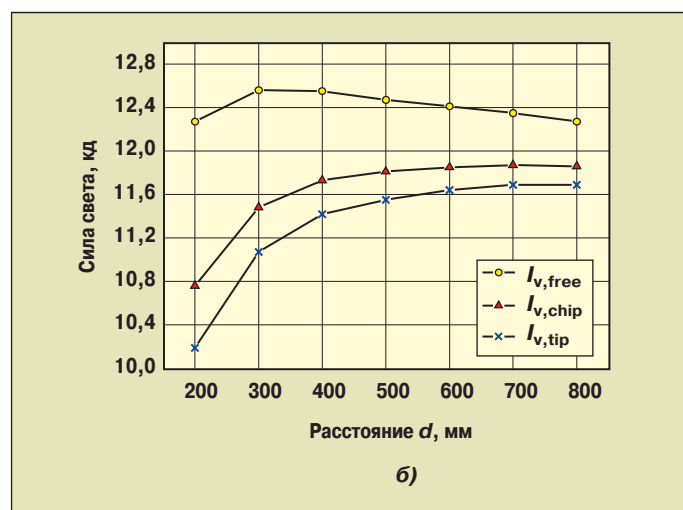
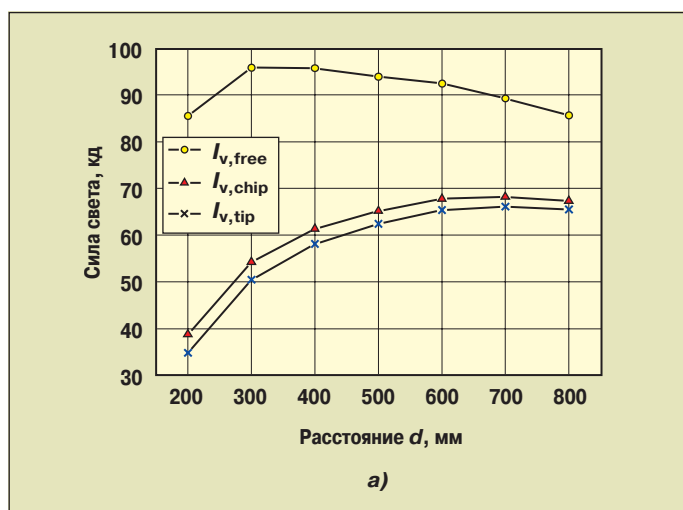


Рис. 1. Зависимости сил света  $I_{v, \text{tip}}$ ,  $I_{v, \text{chip}}$ ,  $I_{v, \text{free}}$  светодиодов № 14 (а) и № 12 (б) от расстояния

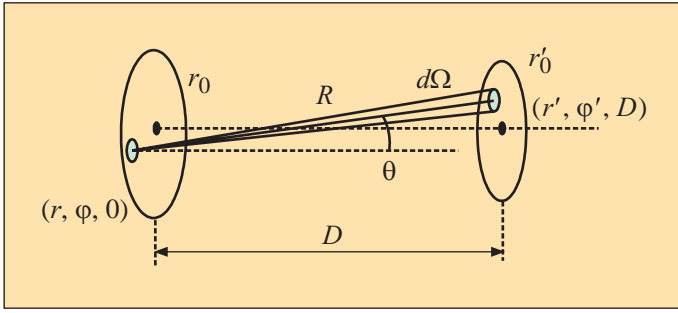


Рис. 2. Геометрические параметры для вывода уравнений модели

**Вывод уравнений модели.** На рис. 2 изображены круглый ИС радиуса  $r_0$  и круглый ПИ радиуса  $r'_0$ , расположенные на расстоянии  $D$  друг от друга. Плоскости ИС и ПИ параллельны, и их центры расположены на оси  $z$  (оптическая ось) цилиндрической координатной системы. Поток излучения элемента поверхности ИС площадью  $dA$  с координатами  $(r, \varphi, 0)$ , падающий на элемент поверхности ПИ площадью  $dA'$  с координатами  $(r', \varphi', D)$ , выражается как  $d\Phi_e = L_e(r, \varphi; \theta)dA_{\perp}d\Omega$ , где  $L_e(r, \varphi; \theta)$  – энергетическая яркость ИС в точке с координатами  $(r, \varphi, 0)$  в направлении  $\theta$  относительно перпендикуляра к его поверхности,  $dA_{\perp} = dA \cos\theta$  – площадь проекции указанного элемента ИС на плоскость, перпендикулярную направлению  $\theta$ , и  $d\Omega = dA' \cos\theta / R^2$  – телесный угол, определяемый точкой  $(r, \varphi, 0)$  и элементом поверхности ПИ  $dA'$  при показанном расстоянии  $R$ . При этом рассматривается однородный ИС с угловой зависимостью энергетической яркости  $L_e(r, \varphi; \theta) = L_0 \cos^{n-1}\theta$ , где  $L_0$  не зависит от  $r$  или  $\varphi$ , а параметр  $n$  указывает степень направленности излучения источника. Для ламбертовского ИС параметр  $n = 1$ . С использованием этих определений сила излучения ИС в направлении  $\theta$  выражается, как  $I_e(\theta) = I_0 \cos^n \theta$ , где  $I_0 = \pi r_0^2 L_0$  – осевая сила излучения ИС.

Полный поток излучения ИС, падающий на ПИ, получается интегрированием  $d\Phi_e$  по всем элементам поверхности  $dA = r dr d\varphi$  и  $dA' = r' dr' d\varphi'$ . Таким образом, зависимость энергетической освещенности на приемнике от расстояния  $D$  может быть выражена, как

$$E_e(D) = \frac{\iint_{AA'} d\Phi_e}{\pi r_0'^2} = \frac{I_0}{\pi r_0^2 r_0'^2} \iint_{AA'} \frac{\cos^{n+1} \theta dA dA'}{R^2}. \quad (2)$$

Так как  $\cos\theta = D/R$  и  $R^2 = D^2 + r^2 + r'^2 - 2rr' \cos(\varphi - \varphi')$  уравнение (2) может быть записано, как

$$E_e(D) = \frac{I_0 D^{n+1}}{\pi^2 r_0^2 r_0'^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} \int_0^{r'_0} \frac{rr' d\varphi d\varphi'}{[D^2 + r^2 + r'^2 - 2rr' \cos(\varphi - \varphi')]^{(n+3)/2}} \dots \rightarrow \dots \frac{dr dr'}{-2rr' \cos(\varphi - \varphi')]^{(n+3)/2}}. \quad (3)$$

При  $n = 1$  интегрирование уравнения (3) может быть выполнено аналитически [8]. В качестве следующего ша-

га преобразуем знаменатель уравнения (3), учитывая, что  $D$  намного больше  $r$  или  $r'$ :

$$\left\{ D^2 \left[ 1 + \frac{r^2 + r'^2 - 2rr' \cos(\varphi - \varphi')}{D^2} \right] \right\}^{(n+3)/4} \approx \approx D^{(n+3)/2} \left[ 1 + \frac{n+3}{4} \frac{r^2 + r'^2 - 2rr' \cos(\varphi - \varphi')}{D^2} \right] = D^{(n-1)/2} [D^2 + \rho^2 + \rho'^2 - 2\rho\rho' \cos(\varphi - \varphi')], \quad (4)$$

где  $\rho = r(n+3)^{1/2}/2$  и  $\rho' = r'(n+3)^{1/2}/2$ . Членами порядка  $(r/D)^4$ ,  $(r'/D)^4$ ,  $(rr'/D^2)^2$ ,  $r^3 r'/D^4$ ,  $rr'^3/D^4$  и выше в уравнении (4) можно пренебречь.

После подстановки уравнения (4) в уравнение (3) получаем уравнение

$$E_e(D) = \frac{I_0 D^2}{\pi^2 r_0^2 r_0'^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} \int_0^{r'_0} \frac{\rho\rho' d\varphi d\varphi'}{[D^2 + \rho^2 + \rho'^2 - 2\rho\rho' \cos(\varphi - \varphi')]^2} \dots \rightarrow \dots \frac{d\rho d\rho'}{-2\rho\rho' \cos(\varphi - \varphi')]^2}, \quad (5)$$

которое имеет ту же форму, что и уравнение (3) при  $n = 1$  и учете того, что  $r_0$  и  $r'_0$  заменяются эффективными радиусами ИС ( $r_S$ ) и ПИ ( $r_D$ ):

$$r_S = \frac{r_0}{2} \sqrt{n+3} \quad \text{и} \quad r_D = \frac{r'_0}{2} \sqrt{n+3}, \quad (6)$$

[3, 6]. Как указано выше, уравнение для энергетической освещенности при  $n = 1$  может быть точно проинтегрировано по площадям ИС и ПИ [8]. Наконец, с учётом функции  $V(\lambda)$  получаем зависимость освещенности от расстояния:

$$E_v(d) = \frac{I_{v,\text{eff}}}{(d + \Delta d)^2 + r_S^2 + r_D^2} g(d), \quad (7)$$

где  $I_{v,\text{eff}}$  – (эффективная) сила света СД по оси измерения,  $D = d + \Delta d$  – записывается как сумма номинального расстояния  $d$  и сдвига  $\Delta d$ , а

$$g(d) = \frac{2}{1 + \sqrt{1 - 4r_S^2 r_D^2 / [(d + \Delta d)^2 + r_S^2 + r_D^2]^2}} \quad (8)$$

и является геометрическим коэффициентом, характерным для круглых ИС и ПИ.

Уравнения (6)–(8) применяются для точного расчёта освещенности от СД на различных расстояниях  $d$  от переднего конца СД  $E_v(d)$ . Измеряя угловое распределение силы света СД, прежде всего определяют параметр направленности  $n$ . Затем уравнение (7) подгоняется к данным, зависящим от расстояния, используя  $I_{v,\text{eff}}$ ,  $\Delta d$  и  $r_0$  в качестве подгоночных параметров. В то же время параметры  $n$  и  $r'_0$  фиксируются на известных значениях. Коэффициент  $g(d)$  обычно близок к едини-

це, но, тем не менее, при точном расчёте записывается в виде (8), так как для СД с узкими углами излучения уравнения (6) усиливают влияние радиусов ИС и ПИ таким образом, что при использовании аппроксимации  $g(d) \approx 1$  получаемая сила света может меняться на несколько процентов.

После вывода всех уравнений для зависимости освещенности, создаваемой СД, от расстояния, может возникнуть вопрос, являются ли  $n$  и  $g(d)$  всегда необходимыми для расчёта. Ясно, что если  $n$  близко к 1, а  $d$  намного больше  $\Delta d$ ,  $r_0$  и  $r'_0$ , то хорошей аппроксимацией уравнения (7) служит уравнение

$$E_v(d) = \frac{I_{v,\text{eff}}}{(d + \Delta d)^2 + r_0^2 + r'_0{}^2}, \quad (9)$$

которое получается фиксированием  $n = g(d) = 1$  в уравнениях (6) и (7). Условия применимости уравнения (9) будут рассмотрены ниже, используя синтезированные данные по освещенности от СД, основанные на точных уравнениях модели (6)–(8).

**Экспериментальная часть.** Для измерений освещенности использовался коммерческий фотометр для СД (производитель – компания LMT Lichtmesstechnik, GmbH). Фотометр имеет круглую входную апертуру радиусом  $r'_0 = 5,64$  мм. Для улучшения угловой чувствительности фотометра используется плоский диффузор, устанавливаемый за апертурой. Сдвиг положения опорной плоскости фотометра от передней плоскости диффузора равен нулю. Фотометр был прокалиброван для измерений освещенности по эталонному фотометру с абсолютными характеристиками.

Разработанный нами метод был апробирован на семнадцати СД разного типа, имеющих разные упаковки, формы светового пучка и уровни мощности [3]. Испытуемые СД поочередно устанавливались на специальном держателе из ПВХ и алюминия. Для одноваттных СД рабочий постоянный ток составлял 330 мА, для остальных СД – 20 мА. Измерения освещенности проводились на фотометрической скамье длиной 4,5 м с использованием

магнитного измерителя длины с разрешением 0,1 мм. Измерения проводились на семи расстояниях ( $d$ ), в зависимости от уровня мощности испытуемого СД, в интервале от 50 до 3000 мм.

Фотометр был установлен на каретке фотометрической скамьи, а испытуемые СД устанавливались на другом конце скамьи. Механическая ось симметрии испытуемых СД направлялась перпендикулярно приемной апертуре фотометра и так, чтобы проходить через центральную точку апертуры фотометра. Это осуществлялось посредством двухлучевого юстирующего лазера и юстирующего зеркала. Для указанной юстировки испытуемых СД использовались алюминиевые корпуса с отверстиями диаметром 6 мм и 12 мм. Для измерения сигнала фотометра использовался цифровой вольтметр, соединенный с измерительным компьютером с помощью шины IEEE-488. Перед измерениями сигналов с использованием электронного затвора, также управляемого через серийную шину, измерялись темновые токи.

**Результаты и анализы.** Зависимости освещенности от расстояния для различных СД были получены экспериментально. Для анализа данных использовался метод на основе уравнений (6)–(8). На рис. 3 приведены примеры результатов для тех же СД, которые использовались в измерениях согласно рис. 1. Сравнивая рис. 1 и рис. 3, видно, что в случае СД №14 (№ 12) разброс значений силы света СД для разных расстояний уменьшился с 50 % (10 %) до статистической флуктуации со стандартным отклонением 0,7 % (0,1 %). Испытанный СД № 14 является 10-миллиметровым СД типа TLOH190P с углом излучения ( $2\Theta_{1/2}$ )  $4^\circ$ , а СД № 12 – СД типа E1L51-YS1A с  $2\Theta_{1/2} = 8^\circ$ .

Расчётные результаты на рис 3, а:  $I_{v,\text{eff}} = 61,2$  кд,  $\Delta d = -73$  мм и  $r_0 = 10$  мм. Параметр  $n = 1915$ , что даёт  $g(d) = 1,15$  при самом малом используемом  $d = 200$  мм. При проведении повторного анализа данных с фиксированным значением  $g(d) = 1$  расчётное значение  $I_{v,\text{eff}}$  увеличилось с 61,2 до 64,0 кд, а изменение полной амплитуды  $I_{v,\text{eff}}$  с 2,0 до 2,4 %. Расчётные результаты на рис. 3, б:  $I_{v,\text{eff}} = 11,7$  кд,  $\Delta d = -5,4$  мм и  $r_0 = 5$  мм. Параметр  $n = 590$ , что даёт  $g(d) = 1,008$  при  $d = 200$  мм.

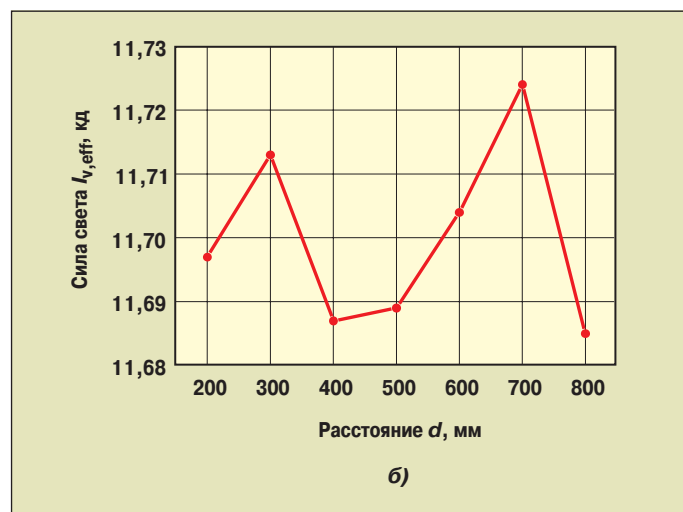
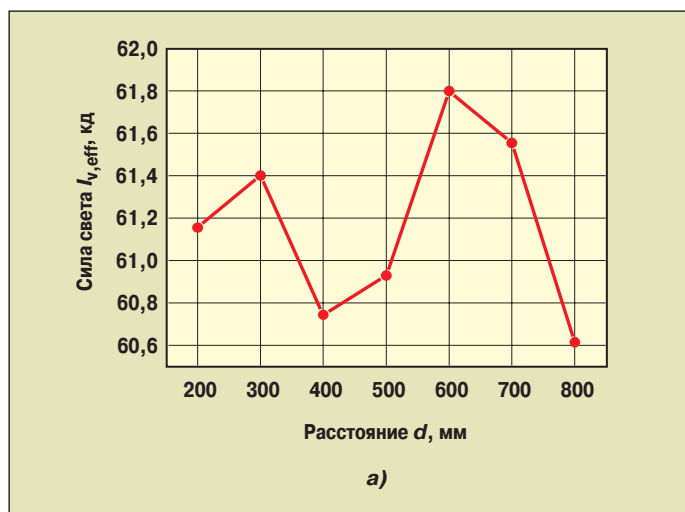


Рис. 3. Зависимость силы света  $I_{v,\text{eff}}$  светодиодов № 14 (а) и № 12 (б) от расстояния  $d$ . Относительные амплитудные изменения равны 2 % (а) и 0,3 % (б), что меньше показанных на рис. 1 в 5–20 раз

Анализ данных с помощью уравнений (6)–(8) дает значение  $r_0 \leq 0,1$  мм для семи типов СД. Эти СД имели  $n \leq 45$  и могли быть достаточно хорошо описаны моделью точечного ИС. Для некоторых СД точечный ИС оказывался на месте светоизлучающего кристалла. Тем не менее, чтобы получить силу света  $I_{v,eff}$ , которая не зависит от измерительного расстояния, следовало допустить, что  $r_0 = 1–12$  мм. Все эти СИД имеют небольшие  $n$  (так, половина их имела  $n$  менее 30). Рис. 1 и 3 иллюстрируют значительное улучшение независимости от указанного расстояния сил света  $I_{v,eff}$ , полученных указанным аналитическим методом.

Интересно было определить такое значение параметра  $n$ , ниже которого расчёт силы света может надёжно выполняться с использованием упрощенного уравнения (9). Для этого с помощью уравнений (6)–(8) были рассчитаны освещённости от СД на расстояниях 200–800 мм при различных параметрах  $n$  и типичных значениях сдвига  $\Delta d$  и радиуса светящей зоны СД. Эти синтезированные данные затем анализировались с использованием упрощенного уравнения (9) и расчётные результаты сравнивались с подлинными значениями параметров. На рис. 4 приведены примеры результатов этих испытаний.

Из этого анализа следует, что вычисление данных с использованием упрощенного уравнения (9) может давать хорошую точность при углах излучения СД свыше  $10^\circ$ . При этом углу излучения  $10^\circ$  соответствует параметр  $n = 200$ .

**Заключение.** Применимость разработанного метода была продемонстрирована на 17 типах различных СД, для которых определялись их силы света с использованием модели точечного ИС. При приложении метода к результатам измерений зависимость силы света СД от измерительного расстояния сильно уменьшается по сравнению с аналитическими результатами, основанными на модели точечного ИС. Существенное упрощение разработанного метода возможно для СД с широкими углами излучения. Если последние больше  $10^\circ$ , сила света СД может довольно точно определяться без информации об угловом распределении силы излучения.

Разработанный метод дал очень точные результаты по силам света, измеренным на различных расстояниях, при этом стандартное отклонение составило менее 0,3 % для большинства испытанных СД. Используя описанные методы, производители СД могли бы измерять освещённость и точно определять силу света своих СД. Фотометрические данные конструируемых световых систем могли бы надёжно оцениваться до макетирования, что могло бы значительно снижать стоимость их разработки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Muray K., Proc. Soc. Photo-opt. 954, 560–567 (1988).
2. Muray K., Appl. Opt. 30, 2178–2186 (1991).
3. Manninen P., Hovila J., Kärhä P., and Ikonen E., Meas. Sci. Technol. 18, 223–229 (2007).
4. Hovila J., Mustonen M., Kärhä P., and Ikonen E., Appl. Opt. 44, 5894–5898 (2005).
5. Manninen P., Hovila J., Seppälä L., Kärhä P., Ylianttila L., and Ikonen E., Metrologia 43, S120–S124 (2006).

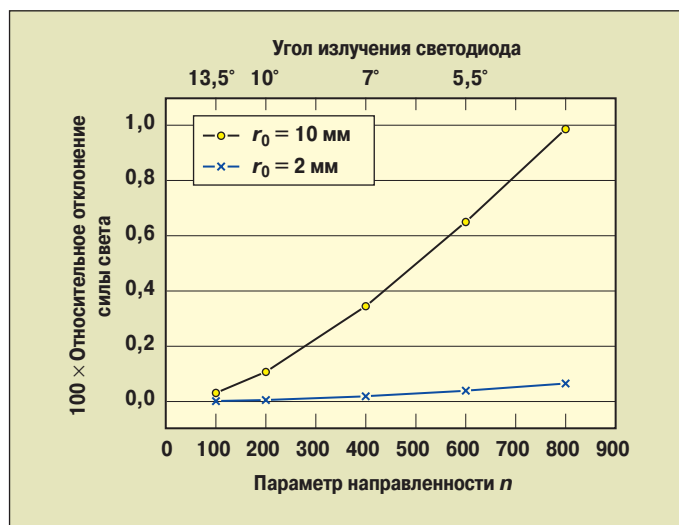


Рис. 4. Относительное отклонение силы света светодиода, полученная по двум разным методам анализа (точному и упрощённому). Использовался сдвиг  $\Delta d = 10$  мм

6. Ikonen E., Manninen P., Hovila J., and Kärhä P., in Proceedings of Metrology Symposium 2006, Queretaro, Mexico, 2006 (CD, 5 p.).
7. Grubner J. and Blumthaler M., Optics Letters 32, 80–82 (2007).
8. Walsh J.W.T., Photometry (New York: Dover, 1965) pp. 120–73.



**Эрки Иконен (Erkki Ikonen),** получил степень доктора наук в Технологическом университете Хельсинки в 1988 г., где он работал в области экспериментальной физики. В 1989 г. начал заниматься метрологией в Институте метрологических исследований, совмещая эти исследования с деятельностью профессора в Технологическом университете Хельсинки, а также, начиная с 2005 г., в Центре Метрологии и аккредитации. Последние 15 лет посвящены работам в области лазерных измерений, прецизионным измерительным системам, современным методам радиометрии и фотометрии



**Петри Кэрхэ (Petri Kärhä),** доктор по электротехнике (1997). Специализируется в области фотометрии и радиометрии, УФ техники. Ведёт курс лекций по измерительной технике в Технологическом университете Хельсинки



**Паси Маннинен (Pasi Manninen),** магистр по электротехнике (2004). Работает над получением степени доктора по технологии в Институте метрологических исследований и Технологическом университете Хельсинки. Специализируется в области фотометрии светодиодов и геометрических вопросов радиометрических измерений

## О светодиодных модулях «ACRICHE»

ВОН КУК СОН<sup>1</sup>

Компания «Seoul Semiconductor», Республика Корея

Связи с повышением интереса к проблемам экологии и энергосбережения, растет интерес к светодиодам (СД) и источникам света (ИС) на их основе (СД ИС) как альтернативе традиционным ИС. Существует множество вариантов их применения.

**Светодиодные модули «Acriche».** Благодаря таким преимуществам СД, как низкое потребление

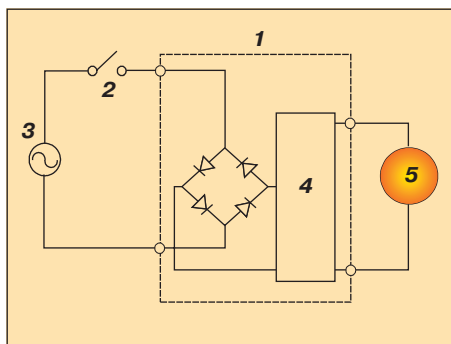


Рис. 1. Схема включения светодиодов:

1 – выпрямитель (АС/DC преобразователь); 2 – выключатель; 3 – сеть переменного тока 220 В; 4 – схема стабилизации режима работы светодиода; 5 – светодиод (постоянный ток)

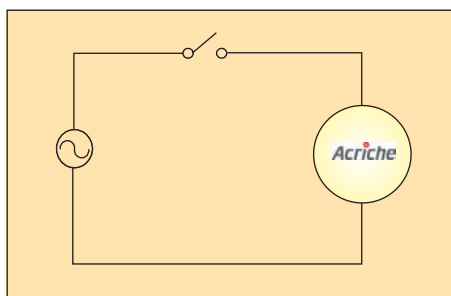


Рис. 2. Схема включения модулей «Acriche»

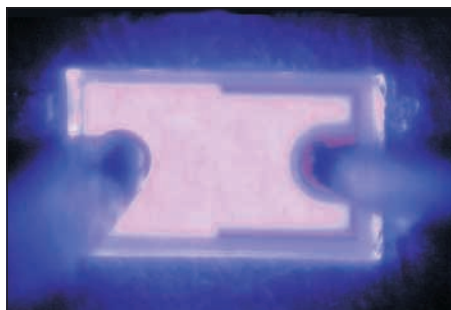


Рис. 3. Кристалл светодиода

электроэнергии, высокая световая отдача, отсутствие вреда для окружающей среды и большой срок службы они рассматриваются как ИС следующего поколения, но чтобы использовать СД для замены традиционных ИС, нужны дополнительные устройства (рис. 1). СД модули «Acriche» обладают всеми достоинствами СД, поскольку в их основе лежит светодиодная технология. Но при этом они могут работать непосредственно от сети переменного тока 110 или 220 В и заменяют традиционные ИС без использования дополнительных устройств (рис. 2). (Модули «Acriche» можно просто включать в штепсельные розетки сетей переменного тока 110 или 220 В без выпрямителя.) Итак, «Acriche» включаются в сеть переменного тока без вспомогательных устройств, тогда как традиционные СД и СД ИС тре-

<sup>1</sup> По материалам доклада на LED Forum, 28–29 ноября 2007 г., Москва.  
E-mail: miradis@seoulsemicon.com  
Перевод с англ. Г.Г. Горелова.

буют применения электрических выпрямителей.

Обычные СД содержат катод и анод и работают только при прямом приложенном напряжении (рис. 3). Напротив, работа модуля «Acriche» не зависит от полярности напряжения, поскольку в его кристалл встроена интегральная схема, состоящая из множества мелких излучающих элементов (рис. 4).

Как показано на рис. 5 и 6, модуль «Acriche» содержит две группы светоизлучающих элементов, соединенных последовательно, причем каждая группа элементов образует зигзагообразную структуру, что позволяет устройству излучать свет более синхронно и равномерно.

В таблице показано, что по цветовой температуре модули «Acriche» делятся на белые и тепло-белые. При этом белые имеют световую отдачу 60 лм/Вт, тогда как тепло-белые выпускаются в двух сочетаниях световая отдача – общий индекс цветопередачи: 35 лм/Вт – 70 и 29 лм/Вт – 80.

Существует несколько модификаций модулей «Acriche», рассчитанных на включения в сети 100, 110, 220 или 230 В (переменного тока), в зависимости от стандартного сетевого напряжения конкретной страны. Кроме того, «Acriche» различаются по мощности: 2, 4 и 8 Вт.

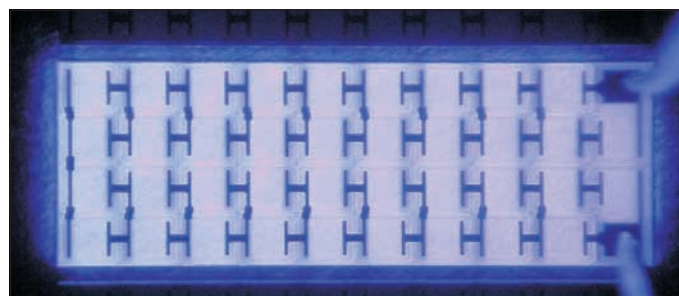


Рис. 4. Кристалл модуля «Acriche»

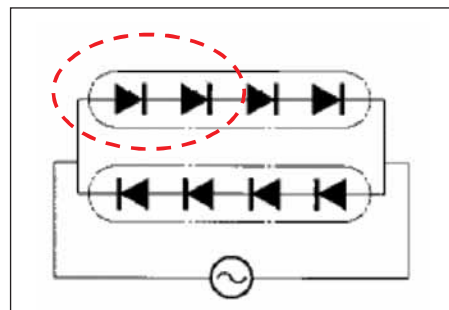


Рис. 5. Схема соединения светоизлучающих элементов в кристалле по рис. 4

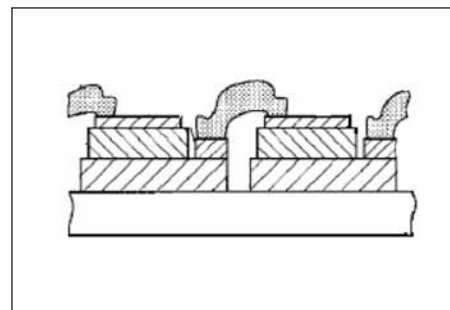


Рис. 6. Вид соединений смежных светоизлучающих элементов по рис. 5



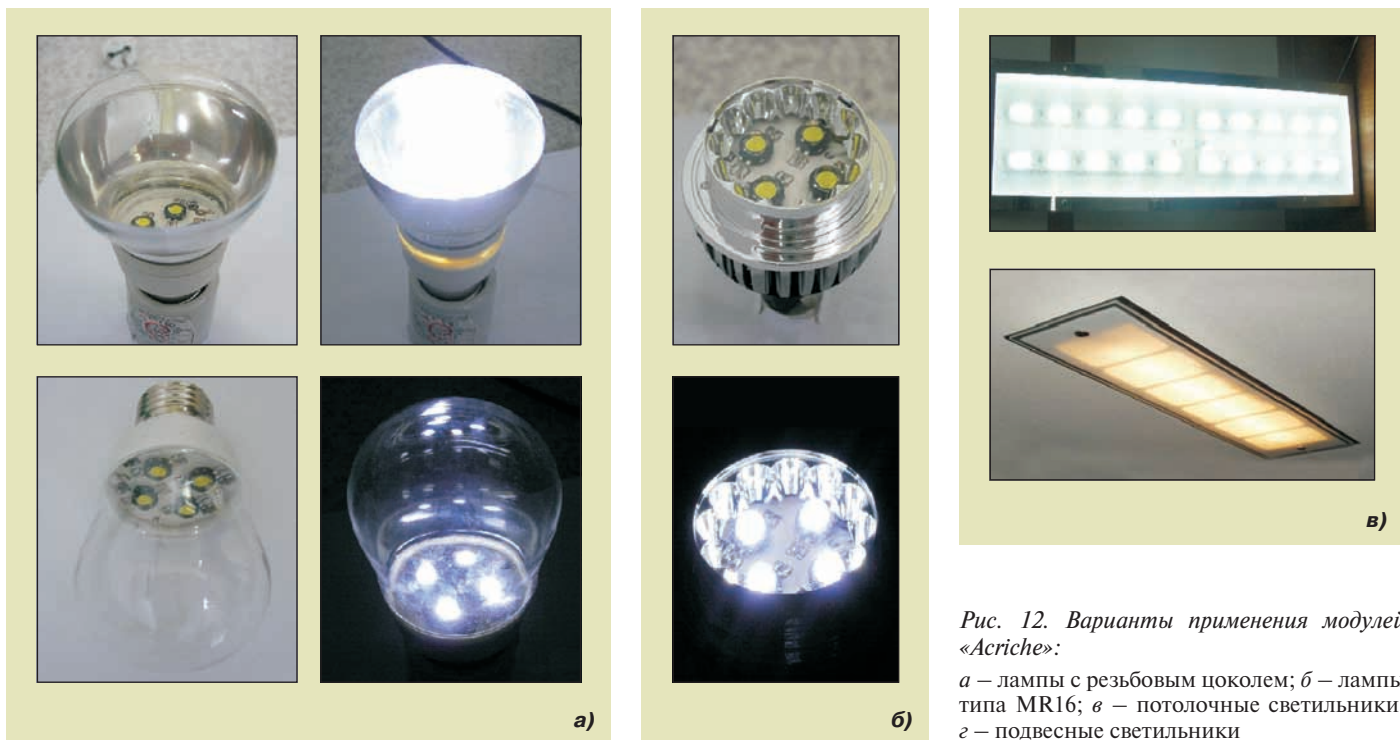
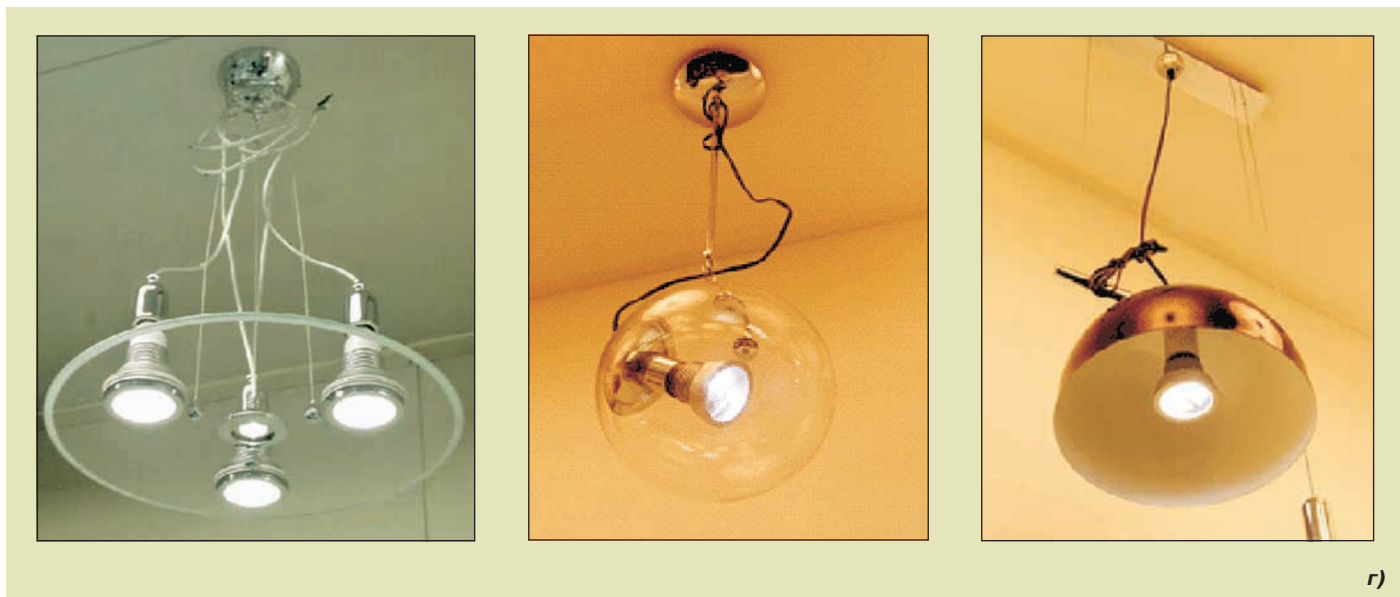


Рис. 12. Варианты применения модулей «Acriche»:

*a* – лампы с резьбовым цоколем; *б* – лампы типа MR16; *в* – потолочные светильники; *г* – подвесные светильники



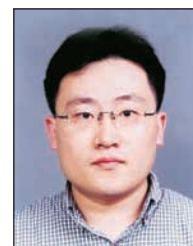
При нагревании модулей «Acriche» их световой поток (рис. 11) и срок службы снижаются. Организация теплового режима работы – крайне важный вопрос применения этих изделий.

На рис. 12 даны примеры светотехнических изделий с модулями «Acriche» в качестве СД ИС.

СД широко используются во всех видах освещения.

Модули «Acriche» представляют собой новую концепцию СД технологии и облегчают жизнь людей.

Это по-настоящему экологически чистые ИС завтрашнего дня. Они непосредственно включаются в розетки сетей переменного тока, без дополнительного выпрямления, исключая, тем самым, конверсионные потери. Кроме того, яркость модулей «Acriche» может легко регулироваться с помощью переменных резисторов. Применение модулей будет способствовать решению проблем экологии, энергосбережения и др.



**Вон Кук Сон (Won Kuk, Son),** старший инженер-исследователь Центра исследований и разработок компании Seoul Semiconductor, Ltd