

## ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ЭЛЕМЕНТ ДЛЯ СВЕТОДИОДНЫХ СИСТЕМ ПОДСВЕТКИ ДИСПЛЕЕВ

Асланов Э.Р.<sup>1</sup>, Досколович Л.Л.<sup>1,2</sup>, Моисеев М.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет),

<sup>2</sup> Институт систем обработки изображений РАН

### Аннотация

Предложен преломляющий оптический элемент светодиода для систем подсветки дисплеев. Оптический элемент рассматривается в качестве альтернативы к линейным источникам света в виде люминесцентных ламп с холодным катодом и предназначен для равномерного освещения двух отрезков на поверхности диффузного отражателя. Расчёт оптического элемента сведён к интегрированию системы двух обыкновенных дифференциальных уравнений, разрешённых относительно производной. Представлены результаты моделирования работы модуля подсветки, соответствующего матрице оптических элементов, формирующих набор отрезков на диффузной отражающей поверхности. Плоскость расположения элементов совпадает с плоскостью диффузного отражателя. Результаты моделирования показывают равномерное освещение прямоугольной области, расположенной на расстоянии 12 – 16 мм от плоскости источников. Световая эффективность рассчитанной системы (доля излучённого светодиодами светового потока, попавшая в выходную плоскость) составляет более 94 %.

**Ключевые слова:** оптический элемент, светодиод, светотехника, система подсветки.

### Введение

В настоящее время жидкокристаллические (ЖК) дисплеи повсеместно используются в мобильных устройствах, мониторах компьютеров, телевизорах. При этом разработка компактных, энергоэффективных систем подсветки ЖК-дисплеев является важнейшей задачей. В качестве источников света в системах подсветки ЖК-мониторов широко используются люминесцентные лампы с холодным катодом (ЛЛХК) [1, 2]. На рис. 1 показано сечение типичной системы подсветки дисплея, которая включает источники света (ЛЛХК), диффузный отражатель, диффузор.

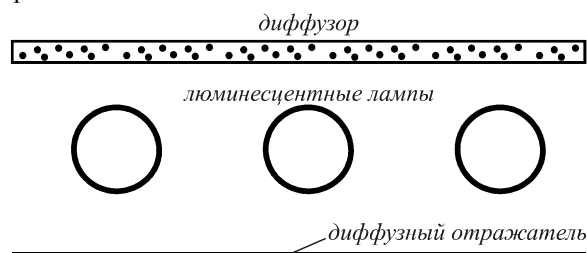


Рис. 1. Конструкция системы подсветки дисплея с люминесцентными лампами

Системы подсветки на основе ЛЛХК позволяют достичь высокой равномерности освещения, однако имеют ряд недостатков. В настоящее время более перспективными считаются светодиодные системы подсветки [3]. По сравнению с ЛЛХК светодиоды потребляют меньше энергии, имеют больший срок службы, устойчивы к вибрациям и ударам. В простейшем варианте ЛЛХК лампу заменяют линейкой (лентой) светодиодных источников.

В данной работе в качестве альтернативы к ЛЛХК предлагается светодиод со специальным преломляющим оптическим элементом (рис. 2). Оптический элемент имитирует ЛЛХК, формируя на диффузном

отражателе два симметричных, равномерно освещённых отрезка. На рис. 2 показан один из отрезков, формируемый правой половиной оптического элемента. Освещаемые отрезки становятся вторичными источниками света.

Отметим, что в настоящее время существуют материалы для диффузных отражателей, имеющие высокий коэффициент отражения в 95–99% и закон рассеяния, близкий к закону Ламберта. Одним из материалов является материал spectralon, производимый компанией Labsphere Corporation [4, 5].

Для достижения высокой световой эффективности предлагается использовать оптический элемент, работающий по принципу полного внутреннего отражения. Отметим, что оптический элемент является осесимметричным (ось симметрии совпадает с освещаемым отрезком). Это обеспечивает простоту производства элемента.

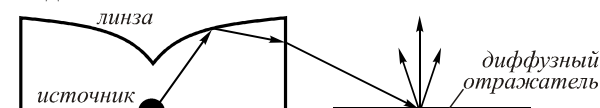


Рис. 2. Конструкция модуля светодиодной системы подсветки дисплея

Таким образом, набор ЛЛХК на рис. 1 может быть заменён набором светодиодов с оптическими элементами, фокусирующими в отрезки на диффузном отражателе. Предлагаемый подход позволяет создать компактные светодиодные системы подсветки дисплеев нового типа. Согласно представленным результатам моделирования, предложенный подход обеспечивает формирование равномерной освещённости в области с большим угловым размером (более 150° в направлении вдоль отрезков) при высокой световой эффективности в 94,5%.

Отметим, что расчёт преломляющего оптического элемента светодиода, фокусирующего в отрезок в

геометрии на рис. 2, впервые приведён в настоящей работе. Ранее элементы такого типа рассчитывались только с использованием приближения тонкого оптического элемента [6, 7].

**1. Расчёт оптического элемента**

Рассмотрим расчёт преломляющего оптического элемента для фокусировки в отрезок оси  $Ox$  при точечном (компактном) источнике излучения (рис. 2). В силу симметрии будем рассматривать только правую часть элемента при  $x > 0$  (рис. 3).

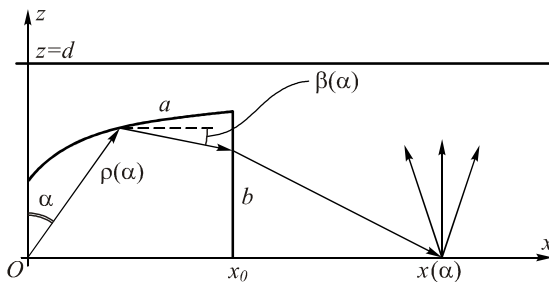


Рис. 3. Оптический элемент для фокусировки в отрезок оси  $Ox$

Оптический элемент имеет ось вращения (ось  $Ox$ ). Профиль оптического элемента состоит из части  $a$ , работающей на эффекте полного внутреннего отражения (ПВО), и плоской выходной поверхности (часть  $b$ ), которая преломляет лучи после отражения от поверхности  $a$ . Мы пренебрегаем лучами, которые сразу падают на поверхность  $b$ .

Обозначим  $\rho(\alpha)$  длину радиус-вектора точки профиля, где  $\alpha \in [0, \alpha_{\max}]$  – угловая координата падающего луча (рис. 3). В работе [8] для  $\rho(\alpha)$  получено следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{d\rho(\alpha)}{d\alpha} = \rho(\alpha) \cdot \operatorname{ctg} \left( \frac{\pi/2 - \alpha - \beta(\alpha)}{2} \right), \quad (1)$$

где функция  $\beta(\alpha)$  задаёт направление луча после ПВО (рис. 3). Из геометрии на рис. 3 несложно получить координату пересечения выходящего из оптического элемента луча с осью  $Ox$  в следующем виде:

$$x(\alpha) = x_0 + [\rho(\alpha) \cos(\alpha) - (x_0 - \rho(\alpha) \sin(\alpha)) \operatorname{tg}(\beta(\alpha))] \frac{\gamma^{1/2}(\alpha)}{n \cdot \sin(\beta(\alpha))}, \quad (2)$$

где  $\gamma(\alpha) = 1 - (n \cdot \sin(\beta(\alpha)))^2$ ,  $n$  – показатель преломления материала элемента. Определим функцию  $x(\alpha)$  в правой части (2) из закона сохранения светового потока. Введём сферические координаты  $(\alpha, \varphi)$ , где  $\varphi$  –

полярный угол в плоскости  $Oyz$ , перпендикулярной плоскости рис. 3. Поскольку оптический элемент расположен при  $z > 0$ , то  $\varphi \in [0, \pi]$ . В указанных координатах элемент телесного угла, соответствующий отрезку  $\varphi \in [0, \pi]$ , имеет вид:

$$d\Omega(\alpha) = \pi \sin(\pi/2 - \alpha) d\alpha.$$

Для записи закона сохранения светового потока необходимо приравнять световой поток, падающий на элемент  $dx$  освещаемого отрезка, к световому потоку от источника, излучённому в элемент телесного угла  $d\Omega(\alpha)$ . Таким образом, можно записать следующее равенство:

$$\sin(\pi/2 - \alpha) \left( \int_0^\pi I(\alpha, \varphi) d\varphi \right) d\alpha = E(x) dx, \quad (3)$$

где  $E(x)$ ,  $x \in [x_1, x_2]$  – заданная освещённость на отрезке,  $I(\alpha, \varphi)$  – интенсивность источника излучения. Отметим, что корректное задание освещённости  $E(x)$  требует выполнения условия нормировки:

$$\int_0^{\alpha_{\max}} \sin(\pi/2 - \alpha) \left[ \int_0^\pi I(\alpha, \varphi) d\varphi \right] d\alpha = \int_{x_1}^{x_2} E(x) dx. \quad (4)$$

При постоянной освещённости  $E(x) = E_0$ ,  $x \in [x_1, x_2]$  проинтегрируем (4) и получим:

$$x(\alpha) = x_1 + \frac{1}{E_0} \int_0^\alpha \cos \alpha \left[ \int_0^\pi I(\alpha, \varphi) d\varphi \right] d\alpha. \quad (5)$$

В случае ламбертовского источника, излучающего по оси  $Oz$ , интенсивность источника в координатах  $(\alpha, \varphi)$  имеет вид:

$$I(\alpha, \varphi) = I_0 \cos \alpha \sin \varphi. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5), получим  $x(\alpha)$  в аналитическом виде:

$$x(\alpha) = x_1 + (x_2 - x_1) \frac{2\alpha + \sin(2\alpha)}{2\alpha_{\max} + \sin(2\alpha_{\max})}. \quad (7)$$

Подставим функцию  $x(\alpha)$  в (2) и продифференцируем полученное уравнение по переменной  $\alpha$ . В результате получим следующее дифференциальное уравнение:

$$d\beta(\alpha) / d\alpha = F(\alpha, \beta(\alpha), \rho(\alpha), \rho'(\alpha), x'(\alpha)), \quad (8)$$

где

$$F(\alpha, \beta, \rho, \rho', x') = 2 \frac{n \sin(\beta(\alpha)) x'(\alpha) \gamma^{1/2}(\alpha) + \sec(\beta(\alpha)) \gamma(\alpha) (\sin(\alpha - \beta(\alpha)) \rho(\alpha) - \cos(\alpha - \beta(\alpha)) \rho'(\alpha))}{n^2 \sec(\beta(\alpha)) \sin(2\beta(\alpha)) (x_0 \sin(\beta(\alpha)) - \cos(\alpha - \beta(\alpha)) \rho(\alpha)) - 2\gamma(\alpha) g(\alpha)}, \quad (9)$$

$$g(\alpha) = x_0 \operatorname{tg}^2(\beta(\alpha)) + (\cos(\alpha) \operatorname{ctg}(\beta(\alpha)) - \sin(\alpha) \operatorname{tg}^2(\beta(\alpha))) \rho(\alpha).$$

Производная  $\rho'(\alpha)$ , входящая в правые части в (8), (9), определена в уравнении (1). Производная

$x'(\alpha)$  в правой части в (8), (9) может быть получена из уравнений (5) или (7). После подстановки указан-

ных выражений для производных  $\rho'(\alpha)$  и  $x'(\alpha)$  в (8) правая часть (8) будет зависеть только от переменной  $\alpha$  и функций  $\beta(\alpha)$ ,  $\rho(\alpha)$ . Таким образом, расчёт оптического элемента для формирования отрезка с заданной освещённостью сведён к интегрированию системы двух обыкновенных дифференциальных уравнений (1), (8), разрешённых относительно производных. Указанная система может быть проинтегрирована с использованием стандартных численных методов (например, метода Рунге–Кутты).

В рамках рассматриваемого подхода предполагается, что оптический элемент формирует освещённый отрезок на диффузном отражателе. При этом освещаемый отрезок будет вторичным источником излучения.

**2. Результаты численного моделирования**

Разработанный метод расчёта оптического элемента был реализован в среде программирования Matlab [9]. На основе формул (1), (7)–(9) был рассчитан оптический элемент для равномерного освещения двух симметричных отрезков при ламбертовском источнике излучения. Для численного интегрирования системы дифференциальных уравнений (1), (8) использовалась функция ode45 из библиотеки Matlab. Расчёт был проведён при следующих параметрах:  $\rho(0) = 1$  мм (расстояние от источника до поверхности оптического элемента по оси  $Oz$ ),  $\alpha_{\max} = 70^\circ$  (угловой размер части  $a$  профиля на рис. 3),  $x_1 = 50$  мм,  $x_2 = 150$  мм (координаты концов отрезка), показатель преломления материала элемента  $n = 1,493$ . Рассчитанный профиль правой половины элемента представлен на рис. 4. Габаритные размеры оптического элемента (правой части) по осям координат составляют 14,3 мм, 10,4 мм, 5,2 мм.

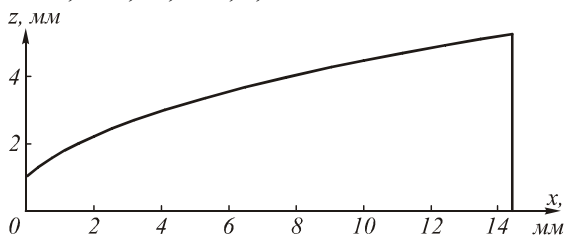


Рис. 4. Профиль оптического элемента (правая часть) для равномерного освещения отрезка оси  $Ox$  при ламбертовском источнике

Для проверки правильности расчётов было выполнено моделирование работы рассчитанного оптического элемента в программе для светотехнических расчётов TracePro [10] (рис. 5).

На рис. 5а приведено полутоновое распределение освещённости, формируемое оптическим элементом в плоскости  $z=0$ , содержащей отрезки. На рис. 5б показан график распределения освещённости вдоль оси  $Ox$ . Распределения освещённости получены в программе TracePro при трассировке 200 000 лучей и полностью соответствуют требуемому распределению (равномерное освещение двух отрезков с длиной 100 мм). Световая эффективность оптического

элемента (доля излучённого светового потока, попавшая в плоскость  $z=0$ ) превышает 94,5%.

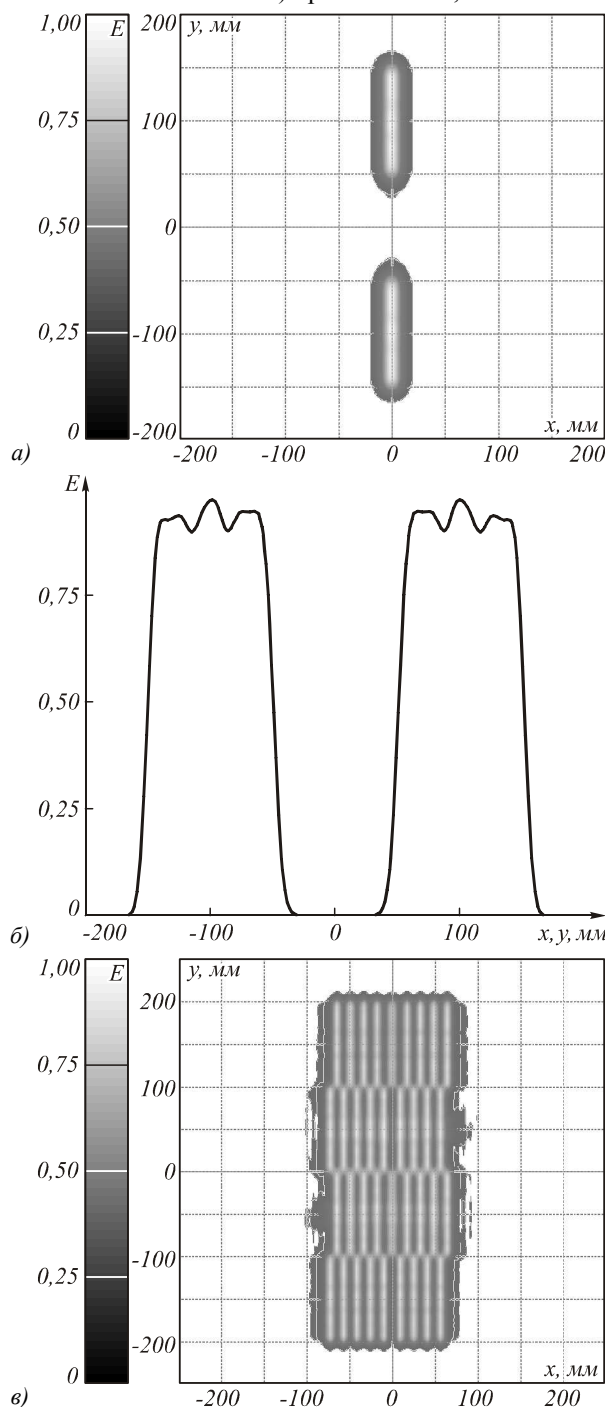


Рис. 5. Распределение освещённости, формируемое оптическим элементом для равномерного освещения двух отрезков в плоскости  $z=0$  (правая часть профиля элемента показана на рис. 4) (а, б); распределение освещённости, формируемое двумя линейками оптических элементов (по 9 элементов в линейке) (в)

На рис. 5в приведено распределение освещённости, формируемое матрицей из 18 оптических элементов (две линейки по 9 элементов). Оптические элементы в линейке отстоят на 16 мм. Линейки сдвинуты одна относительно другой на 8 мм по оси  $Ox$  и на 100 мм по оси  $Oy$ .

При использовании рассматриваемых оптических элементов в системе подсветки в плоскости  $z=0$  следует расположить диффузный отражатель. При этом конечной задачей является получение равномерного распределения света в некоторой плоскости  $z=d$  (рис. 3) над оптическим элементом.

Будем считать, что диффузный отражатель рассеивает в соответствии с законом Ламберта [4, 5]. В этом случае отрезки, формируемые в плоскости  $z=0$  (рис. 5б), являются вторичными ламбертовскими источниками. На рис. 6а, б представлены полутоновые распределения освещённости, формируемые в плоскостях  $z=11,8$  мм и  $z=16$  мм, в случае, когда плоскость  $z=0$  является ламбертовской отражающей поверхностью.

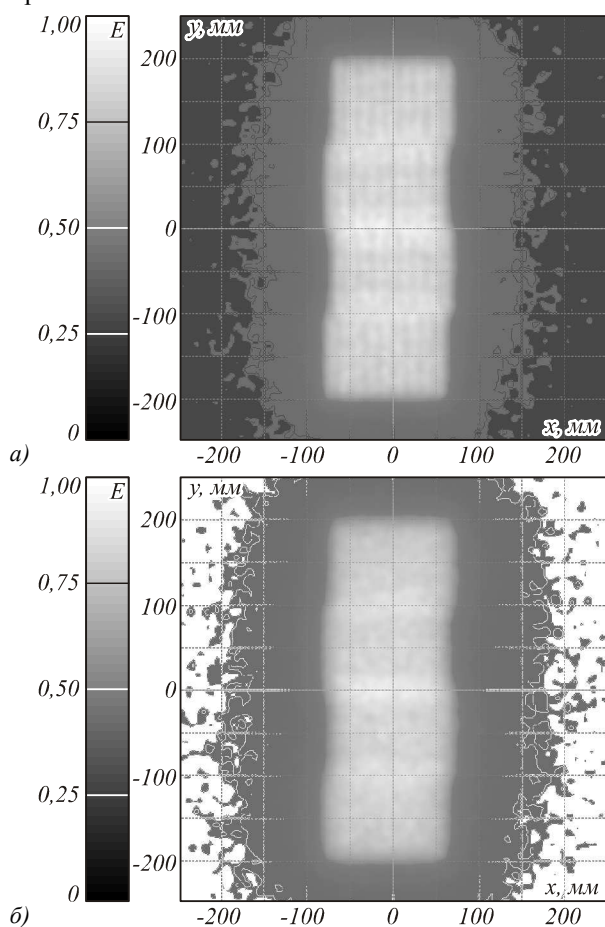


Рис. 6. Распределения освещённости в плоскостях  $z=11,8$  мм (а) и  $z=16$  мм (б), формируемые набором из 18 оптических элементов (две линейки по 9 элементов) в случае ламбертовской отражающей поверхности

Распределения на рис. 6 рассчитаны в программном обеспечении TracePro® для рассмотренного выше набора из 18 оптических элементов (две линейки по 9 элементов). При этом при моделировании использовалось 200 000 лучей для каждого источника. Рис. 6 показывает возможность получения равномерной освещённости на большой площади. Распределение освещённости в плоскости  $z=11,8$  мм (рис. 6а) является достаточно равномерным в пределах прямоугольной области с размером 350 мм на 100 мм. В то

же время на рис. 6а ещё различимы отрезки, формируемые на диффужном отражателе. В плоскости  $z=16$  мм (рис. 6б) распределение становится ещё более равномерным, и отрезки уже неразличимы. Отметим, что расстояние между отрезками по оси  $Ox$  на рис. 5в также составляет 16 мм. Данный результат согласуется с результатами работы [11], где показано, что наибольшая равномерность освещённости достигается в случае, когда расстояние между ламбертовскими излучателями равно расстоянию до освещаемой плоскости. Таким образом, расстояние  $d$  между оптическими элементами (между отрезками) можно считать параметром, определяющим толщину оптической системы, то есть расстояние до выходной плоскости, на котором формируемое распределение освещённости будет равномерным.

Рассмотренный набор оптических элементов на диффужном отражателе можно рассматривать как фрагмент системы подсветки ЖК-дисплея. Увеличивая (или уменьшая) число элементов, можно равномерно осветить прямоугольную область заданного размера. Важно также отметить, что в отличие от стандартной системы подсветки на основе ЛЛХК (рис. 1) предлагаемая оптическая система не требует наличия внешнего диффузора.

### Заключение

В работе предложен преломляющий оптический элемент светодиода для равномерного освещения двух отрезков на оптической оси. Оптический элемент является осесимметричным и прост в изготовлении. Расчёт оптического элемента сведён к интегрированию системы двух обыкновенных дифференциальных уравнений, разрешённых относительно производной.

Предложенные оптические элементы перспективны для применения в системах подсветки дисплеев. В этом случае отрезки формируются на поверхности диффузного отражателя и рассматриваются как вторичные линейные источники. Представленные результаты моделирования показывают возможность использования набора предложенных оптических элементов, расположенных на диффужном отражателе, для равномерного освещения прямоугольной области заданного размера с высокой световой эффективностью (более 94,5%).

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, грантов РФФИ 13-07-97001, 12-07-13113, 12-07-31055, 12-07-31193 и соглашения 8027.

### Литература (References)

1. **Lin, Ch.** Optimized micro-prism diffusion film for slim-type bottom-lit backlight units / Ch. Lin, Yu. Fang, P. Yang // J. of Display Technology – 2011. – Vol. 7(1). – P. 3-9.
2. **Doshi, M.** Low frequency architecture for multi-lamp CCFL systems with capacitive ignition / M. Doshi, R. Zane, F.J. Azondo // J. of Display Technology – 2009. – Vol. 5(5). – P. 152-161.



3. **Chang, R.-S.** LED Backlight Module by Lightguide-Diffusive Component / R. Chang, J. Tsai, T. Li, H. Liao // J. of Display Technology – 2012. – Vol. 8(2). – P. 79-86.
4. <http://www.labsphere.com/products/reflectance-standards-and-targets/reflectance-targets/spectralon-targets.aspx>
5. **Bhandari, A.** Bidirectional reflectance distribution function of Spectralon white reflectance standard illuminated by incoherent unpolarized and plane-polarized light / A. Bhandari, B. Hamre, O. Frette, L. Zhao, K.J. Stamnes, M. Kildemo // Applied Optics. – 2011. – Vol. 50(16). – P. 2431-2442.
6. **Soifer, V.** Iterative Methods for Diffractive Optical Elements Computation / V. Soifer, V. Kotlyar, L. Doskolovich. – London: Taylor&Francis Ltd., 1997. – 244 p.
7. **Doskolovich, L.L.** Analysis of quasiperiodic and geometric optical solutions of the problem of focusing into an axial segment / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer, A.Ye. Tzaregorodtzev // Optik. – 1995. – Vol. 101(2). – P. 37-41.
8. **Doskolovich, L.L.** Design of TIR optics generating prescribed irradiance distribution in the circle region / L.L. Doskolovich, M.A. Moiseev // J. Opt. Soc. Am. A – 2012. – Vol. 29(9). – P. 1758-1763.
9. <http://www.mathworks.com/>
10. [http://lambdare.com/software\\_products/tracepro/](http://lambdare.com/software_products/tracepro/)
11. **Whang, A.** Designing Uniform Illumination Systems by Surface-Tailored Lens and Configurations of LED Arrays / A. Whang, Yi. Chen, Yu. Teng // J. of Display Technology – 2009. – Vol. 5(3). – P. 94-103.

## HIGH-EFFICIENCY OPTICAL ELEMENT FOR LED DISPLAY BACKLIGHT SYSTEMS

*E. Aslanov<sup>1</sup>, L.L. Doskolovich<sup>1,2</sup>, M.A. Moiseev<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> *S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (National Research University),*

<sup>2</sup> *Image Processing Systems Institute of the RAS*

### Abstract

New design of refractive optical element for display backlight systems is presented. The presented design can be used instead of linear light sources (like electroluminescent lamp with cold cathode). It is intended for uniform illumination of two line segments on the diffuse reflector. The problem of computation of optical surface is reduced to integration of a set of two explicit first-order differential equations. Simulation data for backlight unit containing matrix of designed optical elements demonstrates uniform illumination of rectangular area at the distance of 12-16 mm for LED sources. Light efficiency of the presented optical system is more than 94 %.

**Key words:** optical element, light-emitting diode, nonimaging optics, backlight system.

### Сведения об авторах

*Сведения об авторе Асланов Эмиль – см. стр. 178 этого номера.*

*Сведения об авторе Досколович Леонид Леонидович – см. стр. 145 этого номера.*



**Моисеев Михаил Александрович**, 1986 года рождения, в 2008 году с отличием окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (СГАУ) по специальности 010600 «Прикладные математика и физика». Кандидат физико-математических наук (2011 год), работает научным сотрудником в лаборатории дифракционной оптики Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН). Является членом международного научного общества SPIE. Моисеев М.А. – специалист в области решения обратных задач геометрической оптики. В списке научных работ М.А. Моисеева 18 статей и 5 авторских свидетельств.

Страница в Интернете (Homepage): <http://www.ipsi.smr.ru/staff/MoiseevM.htm> .

E-mail: [mikhail@smr.ru](mailto:mikhail@smr.ru) .

**Mikhail Alexandrovich Moiseev** (b. 1986) graduated with honors (2008) from the Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov (SSAU), majoring in Applied Mathematics and Physics. He received his Philosophy Degree in Physics and Mathematics (2011) from Samara State Aerospace University. He is a researcher in diffraction optics laboratory of Image Processing Systems Institute of the RAS (IPSI RAS). He is a SPIE member. He is co-author of 18 scientific papers and 5 inventions and patents. His current research interests include nonimaging optics.

*Поступила в редакцию 21 марта 2013 г.*