

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 535.318

СВЕТОДИОДНАЯ СИСТЕМА ПОДСВЕТКИ НА ОСНОВЕ МОДУЛЕЙ, ФОРМИРУЮЩИХ РАВНОМЕРНУЮ ОСВЕЩЕННОСТЬ ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ

© 2011 г. Л. Л. Досколович*, доктор физ.-мат. наук; М. А. Моисеев*; О. И. Петрова**

* Институт систем обработки изображений РАН, Самарский государственный
аэрокосмический университет, Самара

** Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Самарская обл.

E-mail: mikhail@smr.ru

Рассчитаны модули системы подсветки, формирующие равномерно освещенную область гексагональной формы для светодиода *Luxeon® Rebel Cool-White*. Среднеквадратичная ошибка формирования равномерного распределения освещенности с угловым размером 143° на расстоянии 15 мм от источника излучения составила 3–4% при энергетической эффективности более 81%. Представленные результаты моделирования показывают, что возможно формирование большой равномерно освещенной области с помощью системы указанных модулей, расположенных в узлах ромбической сетки.

Ключевые слова: светодиод, система подсветки, распределение освещенности.

Коды OCIS: 080.2740, 080.4298

Поступила в редакцию 07.05.2010

Введение

Одним из перспективных видов подсветки жидкокристаллических мониторов является светодиодная подсветка прямого типа [1–3]. В общем случае такая система подсветки представляет собой матрицу модулей подсветки, каждый из которых освещает отдельную область в выходной плоскости. Распределения освещенности, создаваемые модулями, выбираются таким образом, чтобы в результате суммирования освещенностей от различных модулей была сформирована равномерно освещенная область. Модуль подсветки состоит из светодиода и преломляющего оптического элемента, преобразующего излучение от светодиода заданным образом. Расчет преломляющих поверхностей таких оптических элементов является сложной задачей. В настоящее время для ее решения используются оптимизационные итерационные процедуры [4–13].

Важнейшими характеристиками модуля подсветки являются угловой размер формируемой области и расстояние от источника излучения до освещаемой области (толщина модуля). Большой угловой размер и малая толщина являются ключевыми требованиями при проектировании современных тонких систем подсветки, обладающих высокой эффективностью с точки зрения энергопотребления.

Наиболее развитый метод расчета преломляющих поверхностей элементов светодиодов для формирования областей с большим угловым размером представлен в работе [13]. Он основан на градиентной оптимизации формы преломляющей поверхности, представленной в виде бикубического сплайна в сферических координатах, и позволяет формировать равномерную освещенность в областях с угловым размером около 150° при толщине системы порядка 15 мм.

В данной работе метод использован для расчета модулей системы подсветки, формирующих равномерно освещенную гексагональную область от светодиода *Luxeon Rebel Cool-White*. Результаты расчетов показывают, что среднеквадратичная ошибка формирования заданного распределения освещенности составляет 3–4% при эффективности более 81%, и демонстрируют возможность формирования равномерной освещенности на большой площади с помощью системы указанных модулей.

Метод расчета

Приведем краткое описание использованного метода расчета [13]. Геометрия задачи показана на рис. 1. Преломляющий оптический элемент ограничен поверхностью \mathbf{r} и имеет показатель преломления n_1 . Вне оптического элемента находится среда с показателем преломления n_2 . Внутри оптического элемента в области G расположен протяженный источник, излучающий в полусферу $z > 0$.

Задача заключается в определении формы преломляющей поверхности \mathbf{r} из условия формирования в выходной плоскости $z = f$ заданного распределения освещенности $E_0(\mathbf{u})$, где $\mathbf{u} = (u, v)$ – декартовы координаты при $z = f$.

Преломляющая поверхность описывается функцией радиус-вектора $r(\varphi, \psi)$ в виде

$$\mathbf{r}(\varphi, \psi) = \begin{pmatrix} x(\varphi, \psi) \\ y(\varphi, \psi) \\ z(\varphi, \psi) \end{pmatrix} = r(\varphi, \psi) \begin{pmatrix} \sin \varphi \cos \psi \\ \sin \varphi \sin \psi \\ \cos \varphi \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где φ и ψ – углы сферической системы координат. Предполагается, что функция $r(\varphi, \psi)$ является параметризованной и ее вид полностью описывается вектором параметров $\mathbf{c} = (c_1, c_2, \dots, c_N)$

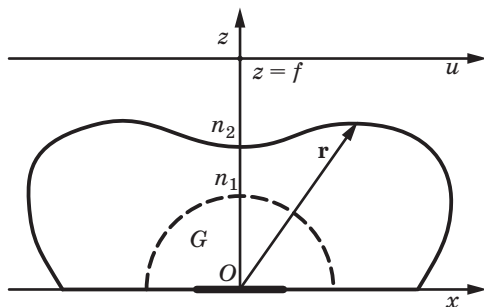


Рис. 1. Схема расположения оптического элемента и источника излучения.

$$r(\varphi, \psi) = r(\varphi, \psi; \mathbf{c}). \quad (2)$$

В таком случае задачу расчета преломляющей поверхности (1), (2) можно рассматривать как задачу оптимизации с параметрами c_i . В данной работе функция $r(\varphi, \psi)$ представлена в виде бикубического сплайна [14]. Его параметрами являются значения радиус-вектора и его производных в узлах сплайновой сетки.

Метод расчета поверхности [13] заключается в градиентном поиске параметров преломляющей поверхности (1), (2), обеспечивающих формирование заданного распределения освещенности. Минимизируемой функцией в методе [13] является среднеквадратичное отклонение формируемого распределения освещенности от заданного

$$\varepsilon(\mathbf{c}) = \sqrt{\frac{1}{\|S\|} \iint_S (E(\mathbf{u}; \mathbf{c}) - E_0(\mathbf{u}))^2 dudv}, \quad (3)$$

где $\|S\|$ – площадь области S , в которой задано требуемое распределение освещенности $E_0(\mathbf{u})$, а функция $E(\mathbf{u}; \mathbf{c})$ представляет формируемое распределение освещенности при текущем векторе параметров \mathbf{c} . Для минимизации функции ошибки (3) в работе [13] используется метод Бройдена–Флетчера–Голдфарба–Шанно [15]. При этом градиент функции ошибки может быть рассчитан в аналитическом виде [13].

Отметим, что в исходном методе [13] предполагается, что источник излучения находится внутри вещества оптического элемента. В производимых светодиодных системах оптический элемент обычно располагается над светодиодом. При этом в нижней поверхности оптического элемента делается сферическое углубление (показано пунктирной линией на рис. 1). В данной работе приведены результаты использования как исходного метода [13], так и его модификации, учитывающей преломление лучей на внутренней сферической поверхности.

Результаты расчета оптических элементов

В работе метод [13] применен для расчета оптических элементов, формирующих равномерное распределение освещенности в гексагональной области. Как показано ниже, при специальном расположении таких оптических элементов в узлах периодической сетки воз-

можно формирование равномерной освещенности на большой площади.

Расчет оптических элементов проводился для светодиода *Luxeon® Rebel Cool-White* [16] при следующих параметрах: расстояние от источника до выходной плоскости – 15 мм, размер стороны гексагональной области – 45 мм, показатель преломления оптического элемента $n = 1,5$. При указанных параметрах угловой размер освещаемой области составляет 143° . Размер излучающего тела у светодиода *Luxeon® Rebel* – $1,2 \times 1,2$ мм, а закон излучения близок к закону Ламберта.

Работоспособность оптических элементов будем оценивать с помощью двух величин: среднеквадратичного отклонения (СКО) формируе-

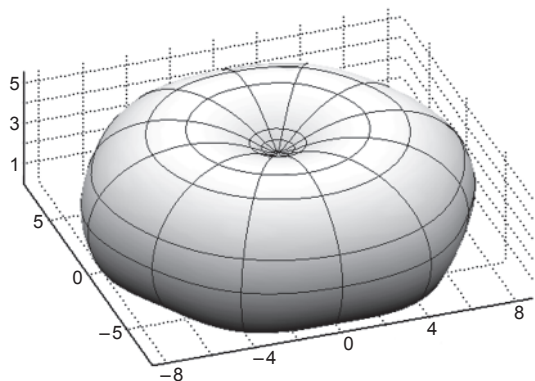


Рис. 2. Внешняя преломляющая поверхность оптического элемента, рассчитанная с помощью метода [13].

мого распределения освещенности от среднего значения и энергетической эффективности. Под энергетической эффективностью оптического элемента понимается доля светового потока от источника, попавшая в освещаемую область на выходной плоскости.

На рис. 2 изображена внешняя поверхность оптического элемента, рассчитанного с помощью метода [13] в геометрии, соответствующей рис. 1. Размеры оптического элемента вдоль координатных осей составляют $17,44 \times 16,76 \times 5,60$ мм. Формируемое распределение освещенности показано на рис. 3. При моделировании распределения освещенности предполагалось, что источник излучения находится внутри вещества оптического элемента. СКО распределения освещенности от среднего значения составило $4,4\%$, энергетическая эффективность – $80,2\%$. Распределение освещенности на рис. 3 рассчитано с помощью специализированного программного обеспечения *TracePro®* [17]. Подчеркнем, что *TracePro®* не позволяет рассчитывать рассматриваемые в работе оптические элементы и используется только для финального моделирования их работы.

На рис. 4 приведено распределение освещенности, формируемое рассчитанным оптическим элементом (с внешней поверхностью, изображенной на рис. 2), но имеющим в центре нижней поверхности сферическое углубление с радиусом 3 мм. При этом источник излучения расположен уже вне оптического элемента в среде с показателем преломления $n = 1$. При добавле-

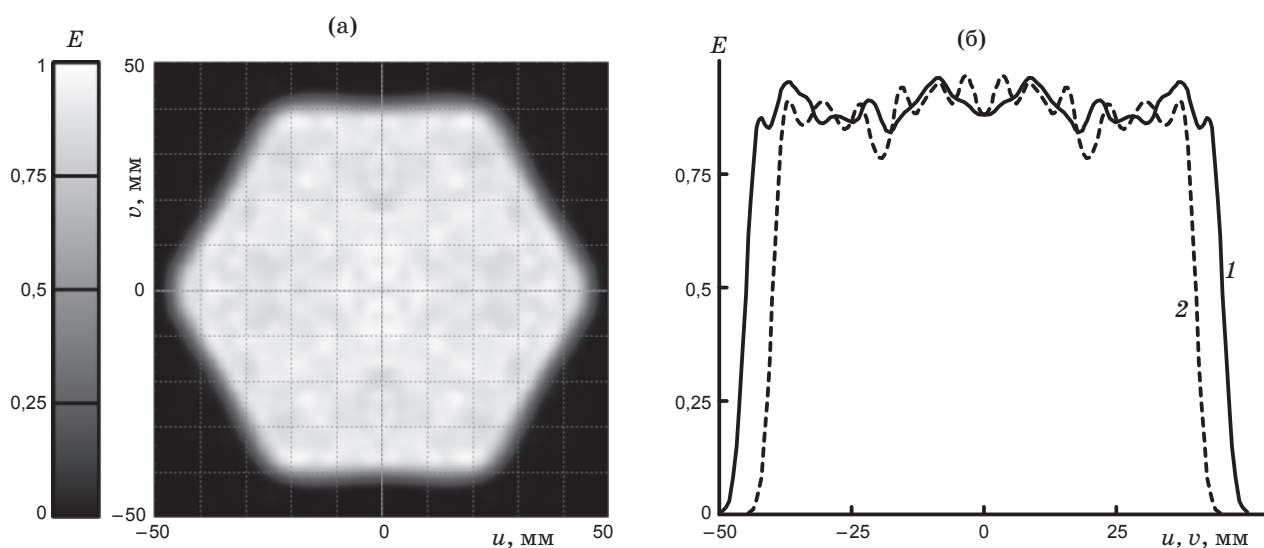


Рис. 3. Распределение освещенности, формируемое оптическим элементом, изображенным на рис. 2. а – полутоновой график распределения освещенности, б – сечения распределения освещенности при $v = 0$ (1), при $u = 0$ (2).

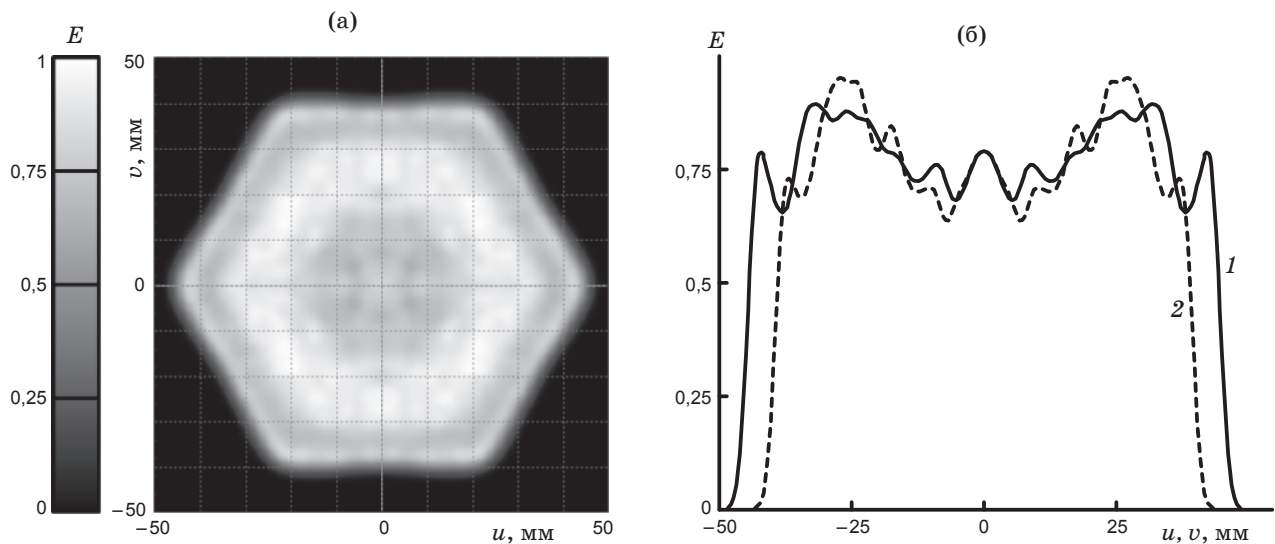


Рис. 4. Распределение освещенности, формируемое оптическим элементом, изображенным на рис. 2 и имеющим сферическое углубление на нижней поверхности. а – полутоновой график распределения освещенности, б – сечения распределения освещенности при $v = 0$ (1), при $u = 0$ (2).

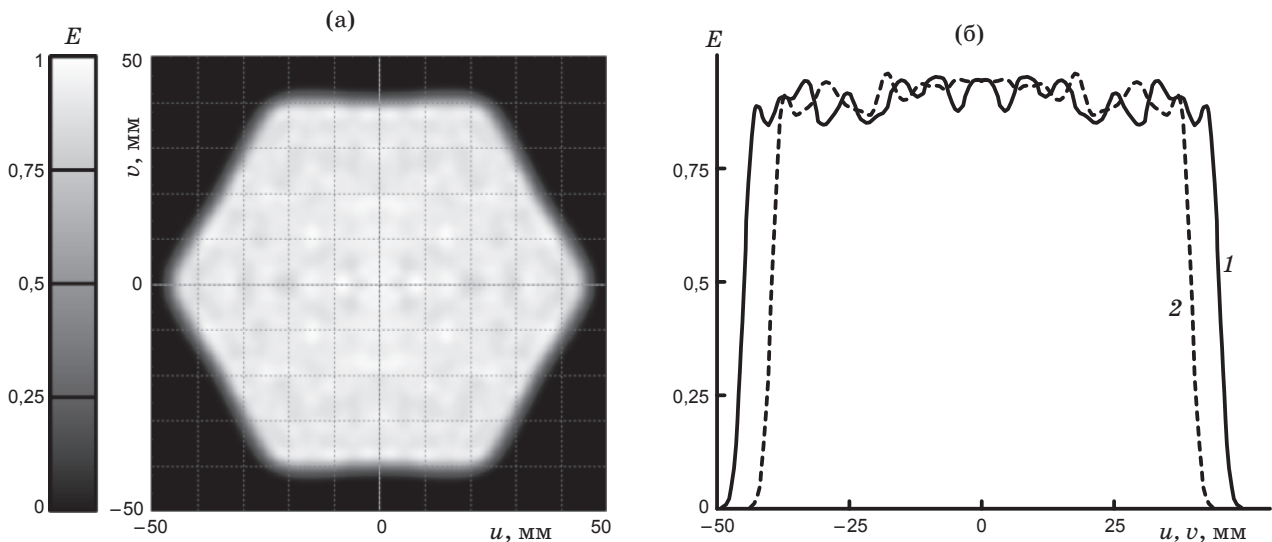


Рис. 5. Распределение освещенности, формируемое дополнительно оптимизированным оптическим элементом с использованием модифицированного метода. а – полутоновой график распределения освещенности, б – сечения распределения освещенности при $v = 0$ (1), при $u = 0$ (2).

нии внутренней сферической поверхности СКО распределения освещенности увеличилось до 12,2%, а энергетическая эффективность осталась неизменной (80,8%).

Сравнение распределений освещенности на рис. 3, 4 показывает, что добавление сферического углубления на нижней поверхности оптического элемента существенно изменяет формируемое распределение освещенности и должно быть учтено при расчете элемента.

Оптический элемент, изображенный на рис. 2, был дополнительно оптимизирован мо-

дифицированным методом, учитывающим наличие внутренней сферической поверхности с радиусом 3 мм. Внешний вид поверхности оптического элемента, полученной при оптимизации, практически не изменился (относительное изменение функции модуля радиус-вектора $r(\varphi, \psi)$ составило менее 1,5%).

Формируемое распределение освещенности показано на рис. 5 и является существенно более равномерным по сравнению с распределением на рис. 4. Учет преломления лучей на внутренней сферической поверхности позволил снизить

СКО формируемого распределения освещенности до 3,2% при энергетической эффективности оптического элемента 81,6%.

При проектировании матричных светодиодных систем подсветки прямого типа модули подсветки располагаются в узлах некоторой периодической структуры. В данном случае в качестве такой структуры необходимо использовать ромбическую сетку, как показано на рис. 6. Варьируя параметры x_l и y_l ромбической сетки, можно добиться отсутствия провалов или подъемов освещенности на стыках шестиугольных освещаемых областей.

На рис. 7 показано расчетное распределение освещенности от матрицы, состоящей из семи модулей подсветки. СКО распределения освещенности

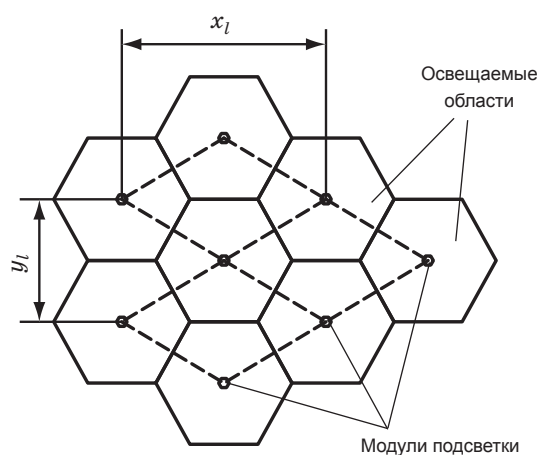


Рис. 6. Схема расположения модулей подсветки.

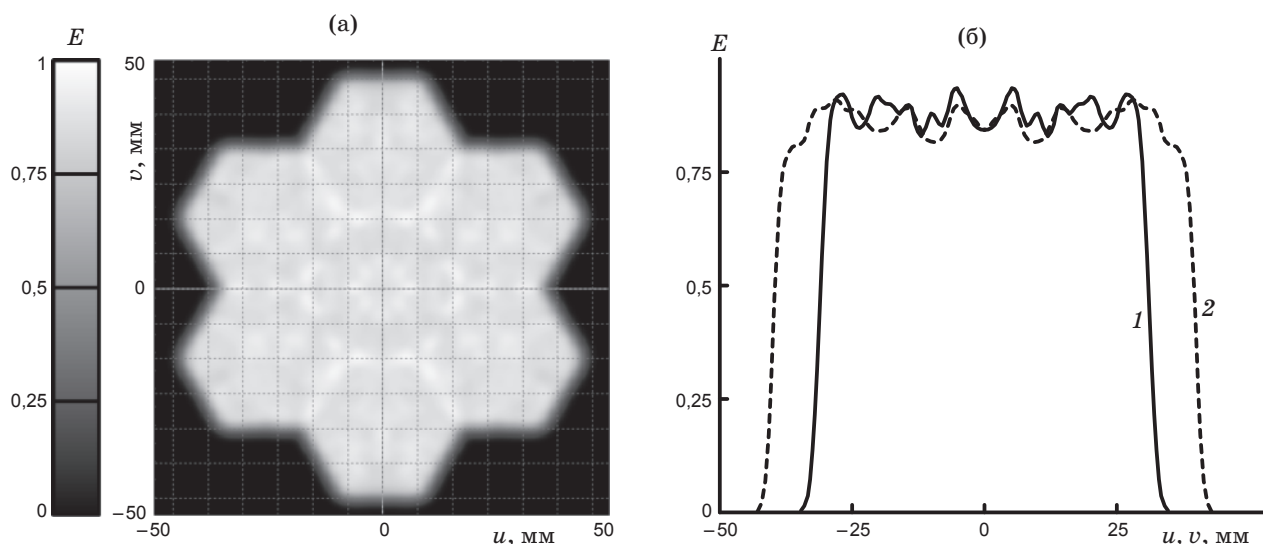


Рис. 7. Распределение освещенности от матрицы модулей подсветки. а – полутоновой график распределения освещенности, б – сечения распределения освещенности при $v = 0$ (1), при $u = 0$ (2).

щенности и энергетическая эффективность совпадают с примером, приведенным на рис. 5, и составляют 3,2% и 81,6% соответственно. Подобранные параметры ромбической сетки – $x_l = 137,8$ мм и $y_l = 79,4$ мм.

Заключение

С помощью градиентного метода рассчитаны преломляющие оптические элементы для светодиода *Luxeon Rebel Cool-White*, формирующие равномерное распределение освещенности в гексагональной области. Размер стороны гексагональной области составляет 45 мм при расстоянии от оптического элемента в 15 мм. Со-

гласно результатам моделирования с помощью специализированного программного обеспечения TracePro® рассчитанные элементы обеспечивают формирование равномерного распределения освещенности со среднеквадратичной ошибкой менее 4% при энергетической эффективности 81,6%.

Показано, что при расположении оптических элементов в узлах ромбической сетки может быть сформировано равномерное распределение освещенности на большой площади. Представленные результаты расчетов показывают перспективность использования рассчитанных оптических элементов при создании систем прямой светодиодной подсветки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Baik-Kyu L., Dong H.Sh., Jin-Jong K., Jun-Bo Y., Hongki K., Sung-Il Ch. Microlens array diffuser for a light-emitting diode backlight system // Opt. Lett. 2006. V. 31. № 20. P. 3016–3018.
2. Chih-Ming W., Hsiao-Chin L., Jeng-Yang Ch., Jui-Wen P., Wen-Shin S. Homogenized LED-illumination using microlens arrays for a pocket-sized projector // Opt. Exp. 2007. V 15. № 17. P. 10483–10491.
3. Whang A.J.-W., Chen Y.-Y., Teng Y.-T. Designing uniform illuminating systems by surface-tailored lens and configurations of LED arrays // J. Disp. Tech. 2009. V. 5. № 3. P. 94–103.
4. Bortz J., Pitou D., Shartz N. Optimal design of a nonimaging projection lens for use with an LED source and a rectangular target // Proc. SPIE. 2000. V. 4092. P. 130–138.
5. Muschaweck J., Ries H. Tailoring freeform lenses for illumination // Proc. SPIE. 2001. V. 4442. P. 43–50.
6. Muschaweck J., Ries H. Tailored freeform optical surfaces // JOSA. A. 2002. V. 19. № 3. P. 590–595.
7. Jacobson B.A., Gendelbach R.D. Lens for uniform LED illumination: an example of automated optimization using Monte Carlo ray-tracing of an LED source // Proc. SPIE. 2001. V. 4446. P. 130–138.
8. Parkyn B., Pelka D. Free-form illumination lens designed by a pseudo-rectangular lawnmower algorithm // Proc. SPIE. 2006. V. 6338. P. 633808.
9. Белоусов А.А., Досколович Л.Л. Градиентный метод решения задачи фокусировки в двумерную область при протяженном источнике // Компьютерная оптика. 2007. Т. 31. № 3. С. 20–26.
10. Белоусов А.А., Досколович Л.Л., Харитонов С.И. Градиентный метод расчета преломляющих поверхностей для формирования заданных распределений освещенности // Автометрия. 2008. Т. 44. № 2. С. 98–106.
11. Белоусов А.А., Досколович Л.Л., Харитонов С.И. Градиентный метод расчета оптических элементов для формирования заданной освещенности на криволинейной поверхности // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 3. С. 30–35.
12. Peifu G., Xu L., Yi D., Zhenrong Zh. Freeform LED lens for uniform illumination // Opt. Exp. 2008. V. 16. № 17. P. 12958–12966.
13. Moiseev M.A., Doskolovich L.L. Design of refractive spline surface for generating required irradiance distribution with large angular dimension // J. Mod. Opt. 2010. V. 57. Принято к публикации.
14. Boor C. De A Practical Guide to Splines. N. Y.: Springer, 2001. 346 p.
15. Gill Ph.E., Murray W., Wright M.H. Practical Optimization. N. Y.: Springer, 1981. 401 p.
16. <http://www.philipslumileds.com/pdfs/DS63.pdf>
17. http://www.lambdaires.com/software_products/tracepro/