

РАСЧЕТ ПРЕЛОМЛЯЮЩЕГО ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАДАННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСВЕЩЕННОСТИ ПРИ ПРОТЯЖЕННОМ ИСТОЧНИКЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

Моисеев М.А., Досколович Л.Л.

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева,
Учреждение Российской академии наук Институт систем обработки изображений

Аннотация

Представлен метод расчета преломляющей поверхности, формирующей заданное распределение освещенности с большими угловыми размерами при протяженном источнике излучения. Метод основан на градиентной оптимизации преломляющей поверхности, представленной в виде бикубического сплайна в сферических координатах. Рассчитаны оптические элементы, формирующие равномерные распределения освещенности в эллиптической и прямоугольной областях. Энергетическая эффективность оптических элементов составляет более 73 %, а неравномерность формируемого распределения освещенности – менее 7,5 %. Отношение размера освещаемой области к расстоянию до источника составляет около 6,5, что более чем в два раза превосходит результаты, представленные в известных публикациях.

Ключевые слова: расчет оптических элементов, равномерная освещенность, светоизлучающий диод, градиентный метод.

Введение

Расчет оптических элементов для формирования заданного распределения освещенности является важной задачей, возникающей при проектировании автомобильной светотехники [1–3], систем подсветки жидкокристаллических мониторов [4,5], систем освещения и т.д. Использование светоизлучающих диодов в светотехнических устройствах становится все более масштабным в связи с увеличением их светового потока и уменьшением стоимости.

При проектировании оптических головок светодиодов задача состоит в расчете внешней преломляющей поверхности головки светодиода из условия формирования заданного распределения освещенности в некоторой плоскости. При точечном (компактном) источнике излучения указанная задача сводится к решению нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных типа уравнения Монже-Ампера [6,7]. Решение данных уравнений является сложной задачей. Аналитические решения известны только для частных случаев поверхностей с радиальной или цилиндрической симметрией [8-15]. Для расчета сложных, нерадиально-симметричных оптических поверхностей (в англоязычной литературе – free-form) используются оптимизационные итерационные процедуры, требующие больших временных и вычислительных затрат [16-24]. Работоспособность итерационных процедур [16-24] является недостаточной. Задача расчета преломляющей (отражающей) оптической поверхности для формирования постоянной освещенности в прямоугольной области с большим угловым размером по-прежнему является актуальной.

В работах [17,18] рассмотрен метод расчета преломляющих поверхностей, основанный на численном решении уравнения Монже-Ампера. Метод позволяет создавать сложные распределения освещенности, например, в виде букв. В расчетном примере в [18] буквы формируются на равномерно засвеченном фоне.

Это связано с требованием непрерывности заданного распределения освещенности. Освещенность фона составляет порядка 30 % от освещенности в зоне букв, что существенно снижает световую эффективность. Примеры расчета преломляющих поверхностей для формирования практически важных прямоугольной и эллиптической областей в [17,18] не рассмотрены.

В работах [21–23] представлены градиентные методы расчета преломляющей поверхности для формирования заданного распределения освещенности при точечном и протяженном источниках излучения. Методы основаны на оптимизации функции эйконала, заданной в прилегающей к оптическому элементу плоскости, и последующем восстановлении преломляющей поверхности по распределению эйконала. Приведенные в работах [21–23] примеры показывают хорошую работоспособность метода для источников, излучающих в небольшие телесные углы (порядка $\pi/5 - \pi/2$ стерadian). Как правило, реальный источник излучает в полусферу (светодиоды) или сферу (лампы накаливания). Для эффективного использования излучения источника необходимо перераспределять весь его световой поток в освещаемую область.

Наиболее развитый метод расчета преломляющей поверхности представлен в работе [24]. Расчет преломляющей поверхности в [24] основан на решении нелинейной системы уравнений. Метод требует задания функции лучевого соответствия между угловыми координатами исходящих из источника лучей и координатами лучей, попадающих в область регистрации. В работе [24] не предложен общий способ задания функции лучевого соответствия, что ограничивает область применения метода. Тем не менее, метод [24] позволяет формировать заданное распределение освещенности в прямоугольнике и правильном восьмиугольнике с высокой эффективностью и равномерностью.

При проектировании систем подсветки дисплеев большую роль играет толщина системы, определяемая как расстояние от источника излучения до освещаемой области. При уменьшении толщины системы увеличиваются угловые размеры освещаемой области. При этом возрастают френелевские потери и на преломляющей поверхности могут появляться зоны, в которых происходит полное внутреннее отражение. В расчетных примерах, приведенных в [18, 21-24], отношение размера освещаемой области к толщине оптической системы не превышает 2,8, что соответствует максимальному угловому размеру освещаемой области 110° . В работах [18, 21-24] не учитываются френелевские потери, и поэтому угловой размер в 110° является почти предельным при таких методах расчета.

В работе [25] представлен градиентный метод, позволяющий рассчитывать преломляющие поверхности, формирующие заданное распределение освещенности при точечном источнике излучения. Метод [25] учитывает френелевские потери на отражение, что позволяет формировать равномерно освещенные области с угловым размером 150° и более. Ограничением метода [25] является требование малости размеров источника излучения. В данной работе представлена модификация метода [25] на случай протяженного источника излучения. Расчетные примеры показывают, что метод позволяет формировать равномерно освещенные области в виде эллипса и прямоугольника с угловыми размерами 145° при протяженном источнике 1×1 мм. Отношение размера освещенной области к расстоянию до нее составляет порядка 6,5, что более чем в два раза превосходит результаты, опубликованные в работах [18, 21-24].

1. Постановка задачи

Преломляющий оптический элемент ограничен поверхностью \mathbf{r} и имеет показатель преломления n_1 (рис. 1). В начале координат внутри оптического элемента расположен протяженный источник, излучающий в полусферу $z > 0$. Оптический элемент находится в среде с показателем преломления n_2 (рис. 1).

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 $z = f$.

Пусть преломляющая поверхность описывается функцией радиус-вектора $\mathbf{r}(\varphi, \psi)$ в виде:

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

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

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

В таком случае задачу расчета преломляющей поверхности (2) можно рассматривать как задачу оптимизации с параметрами c_i .

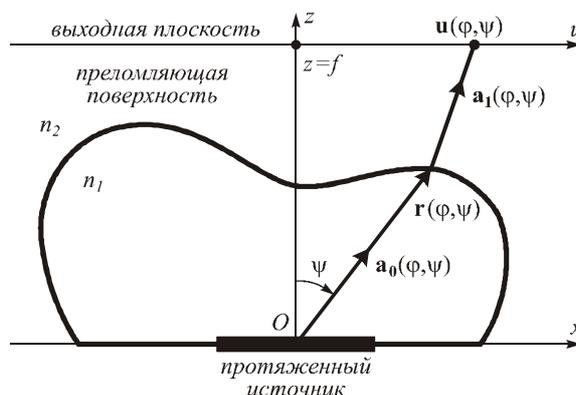


Рис. 1. Схема расположения оптического элемента, протяженного источника излучения и выходной плоскости

В этой работе функция $r(\varphi, \psi)$ представляется в виде бикубического сплайна. Его параметрами являются значения радиус-вектора и его производных в узлах сплайновой сетки [26]. Ниже, в расчетных примерах, используется сетка (φ_i, ψ_j) , $\varphi_i = i\pi/4$, $i = 0, 1, \dots, 8$, $\psi_j = j\pi/7$, $j = 0, 1, \dots, 7$. Она имеет 64 узла, что соответствует 256 параметрам оптимизации (64 значения радиус-вектора, 128 значений его первых производных и 64 значения смешанной производной). В случае формирования симметричных распределений освещенности в прямоугольной или эллиптической области достаточно определить функцию $r(\varphi, \psi)$ только в первом квадранте. Это позволяет более чем в четыре раза снизить количество параметров оптимизации.

2. Модификация метода расчета преломляющей поверхности

Рассмотрим метод расчета, представленный в [25] для случая точечного источника излучения. Метод [25] заключается в градиентном поиске параметров преломляющей поверхности, обеспечивающих формирование заданного распределения освещенности. Минимизируемой функцией в [25] является среднеквадратичное отклонение формируемого распределения освещенности от заданного

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

где $\|S\|$ – площадь области S , в которой задано требуемое распределение освещенности $E_0(\mathbf{u})$. Функция $E(\mathbf{u}; \mathbf{c})$ в выражении (3) представляет формируемое распределение освещенности, рассчитываемое по формуле [25]:

$$E(\mathbf{u}; \mathbf{c}) = \iint_D I(\varphi, \psi) T(\varphi, \psi; \mathbf{c}) \times \frac{(\mathbf{s}_1(\varphi, \psi), \mathbf{N}(\varphi, \psi; \mathbf{c}))}{r^2(\varphi, \psi; \mathbf{c})} \delta_\sigma(\mathbf{u} - \mathbf{u}(\varphi, \psi; \mathbf{c})) d\varphi d\psi, \quad (4)$$

где $I(\varphi, \psi)$ – интенсивность точечного источника излучения, $T(\varphi, \psi; \mathbf{c})$ – коэффициент пропускания Френеля при прохождении луча через преломляющую поверхность, $\mathbf{s}_1(\varphi, \psi)$ – единичный вектор исходящего луча, $\mathbf{N}(\varphi, \psi; \mathbf{c}) = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \varphi} \times \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \psi}$ – вектор нормали к поверхности в точке $\mathbf{r}(\varphi, \psi; \mathbf{c})$, δ_σ – функция Гаусса, аппроксимирующая дельта функцию, $\mathbf{u}(\varphi, \psi; \mathbf{c})$ – точка на выходной плоскости, в которую попадает луч, испущенный источником в направлении (φ, ψ) . Интегрирование в выражении (4) ведется по области

$$D = \{(\varphi, \psi) : \varphi \in [0, \pi/2], \psi \in [0, 2\pi]\}.$$

Градиентный поиск осуществляется по методу Бройдена-Флетчера-Голдфарба-Шанно [27]. При вычислении градиента частные производные функции ошибки (3) имеют вид:

$$\frac{\partial \varepsilon(\mathbf{c})}{\partial c_i} = \frac{1}{\varepsilon(\mathbf{c})} \iint_S (E(\mathbf{u}; \mathbf{c}) - E_0(\mathbf{u})) \times \frac{\partial E(\mathbf{u}; \mathbf{c})}{\partial c_i} du dv, \quad (5)$$

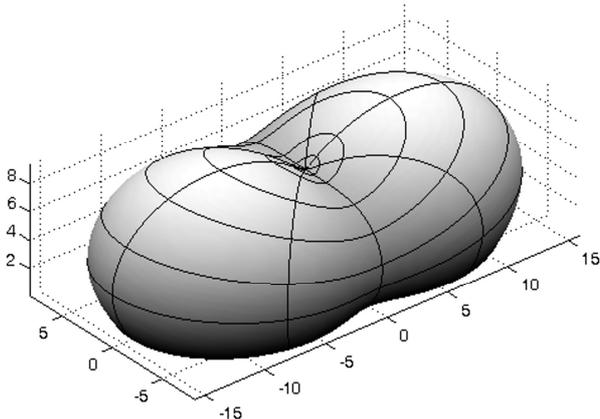


Рис. 2. Оптический элемент, формирующий равномерное распределение освещенности в эллиптической области от точечного источника

где производные $\partial E(\mathbf{u}; \mathbf{c})/\partial c_i$ могут рассчитываться аналитически (прямым дифференцированием выражения (4)) или с использованием формул численного дифференцирования.

Рассмотрим случай плоского протяженного источника излучения, расположенного в области G , при $z = 0$. В простейшем случае протяженный источник может быть аппроксимирован набором N точечных источников. Выражение для распределения освещенности (4) при N источниках принимает вид:

$$E(\mathbf{u}; \mathbf{c}) = \sum_{i=1}^N \iint_D I_i(\varphi, \psi, \mathbf{x}_i; \mathbf{c}) T(\varphi, \psi, \mathbf{x}_i; \mathbf{c}) \times \frac{(\mathbf{s}_1(\varphi, \psi, \mathbf{x}_i; \mathbf{c}), \mathbf{N}(\varphi, \psi; \mathbf{c}))}{(\mathbf{r}(\varphi, \psi; \mathbf{c}) - \mathbf{x}_i)^2} \times \delta_\sigma(\mathbf{u} - \mathbf{u}(\varphi, \psi, \mathbf{x}_i; \mathbf{c})) d\varphi d\psi, \quad (6)$$

где $I_i(\varphi, \psi, \mathbf{x}_i; \mathbf{c})$ – функция интенсивности i -го точечного источника, находящегося в точке $\mathbf{x}_i = (x_i, y_i, 0)$, $\mathbf{x}_i \in G$.

В общем случае, протяженный источник описывается функцией яркости $B(\varphi, \psi, x, y)$. В пределе (когда число точечных источников N стремится к бесконечности) сумма в выражении (6) переходит в двойной интеграл по области G

$$E(\mathbf{u}; \mathbf{c}) = \iint_D \iint_G B(\varphi, \psi, x, y; \mathbf{c}) s_{1z}(\varphi, \psi, x, y; \mathbf{c}) \times T(\varphi, \psi, x, y; \mathbf{c}) \frac{(\mathbf{s}_1(\varphi, \psi, x, y; \mathbf{c}), \mathbf{N}(\varphi, \psi; \mathbf{c}))}{(\mathbf{r}(\varphi, \psi; \mathbf{c}) - (x, y, 0))^2} \times \delta_\sigma(\mathbf{u} - \mathbf{u}(\varphi, \psi, x, y; \mathbf{c})) dx dy d\varphi d\psi. \quad (7)$$

Алгоритм градиентного поиска при переходе от точечного источника к протяженному не изменяется. Производные $\partial E(\mathbf{u}; \mathbf{c})/\partial c_i$ в выражении (5) могут быть рассчитаны прямым дифференцированием (7) или численно.

3. Примеры расчета оптических элементов

Метод расчета [25], модифицированный с учетом выражения (7), был реализован в среде программирования Matlab. Приведем несколько примеров, иллюстрирующих работоспособность метода.

На рис. 2 показан рассчитанный с помощью немодифицированного метода [25] оптический элемент, формирующий равномерное распределение освещенности в эллиптической области при точечном ламбертовском источнике излучения. Расчет производился при следующих параметрах: коэффициент преломления материала оптического элемента – 1,5, расстояние от источника до выходной плоскости – 15 мм, полуоси эллипса – 50 мм и 25 мм. При данных параметрах отношение большой оси эллипса к толщине оптической системы – около 6,6, что соответствует угловому размеру освещаемой области 146° . Габаритные размеры полученного оптического элемента вдоль осей координат – $30,8 \times 16,6 \times 9,5$ мм.

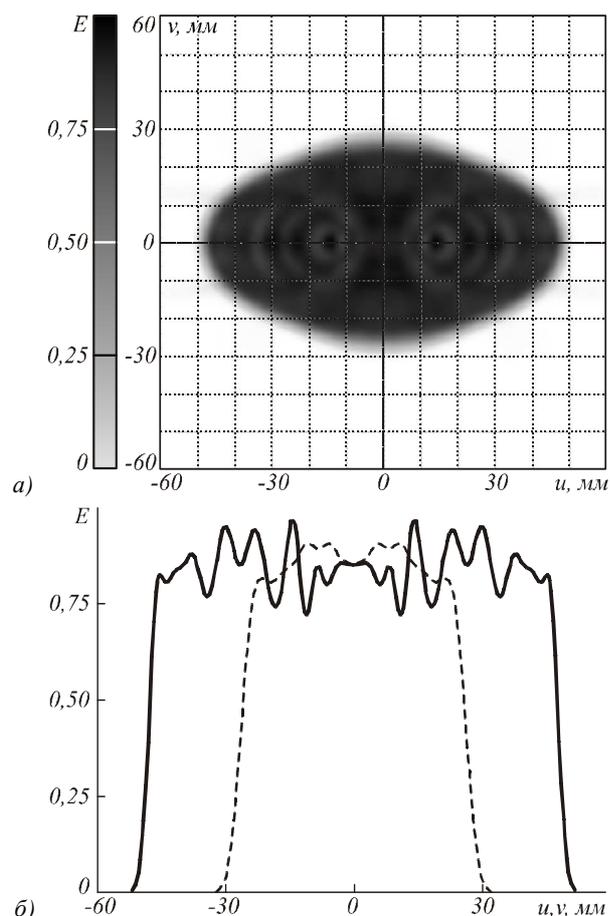


Рис. 3. Распределение освещенности, формируемое оптическим элементом, изображенным на рис. 2, от точечного источника. а) Полутоновое распределение. б) Сечения распределения освещенности: непрерывная линия – $v = 0$, штриховая линия – $u = 0$

В качестве начального приближения для оптимизации был взят оптический элемент, формирующий равномерное распределение освещенности в круглой области [14]. Сплайновая сетка (определенная в первом квадранте) имела 24 узла, что соответствовало 61 параметру оптимизации (с учетом свойств симметрии). Оптимизация заняла порядка 2 часов на компьютере с процессором Intel® Core™2 Quad 9400 (использовались все 4 ядра). На рис. 3 показано распределение освещенности, формируемое оптическим элементом на рис. 2. Распределение освещенности рассчитано с помощью специализированного программного обеспечения TrasePro® [28]. Необходимо отметить, что TrasePro® не позволяет решать рассматриваемые задачи оптимизации. В данной работе TrasePro® используется только для проверки и подтверждения работоспособности рассчитанных преломляющих поверхностей.

Рассчитанный оптический элемент показывает хорошие результаты при небольших размерах используемого источника излучения. При размерах источника менее $0,4 \times 0,4$ мм неравномерность освещенности не превосходит 10 %, энергетическая эффективность остается той же.

Рассмотрим в качестве примера протяженного источника излучения светодиод LUXEON® Rebel LXML-PW51 [29]. Он имеет ламбертовскую диаграмму направленности, а размеры излучающего тела – 1×1 мм. На рис. 4 показано распределение освещенности, формируемое оптическим элементом, изображенным на рис. 2, и светодиодом LUXEON® Rebel. Распределение освещенности на рис. 4 существенно более неравномерное, чем на рис. 2. ОСКО распределения освещенности от заданного увеличилась более чем в 3 раза и составляет 20,1 %. Таким образом, рис. 4 показывает, что приближение точечного источника при данных параметрах приводит к значительному ухудшению равномерности формируемого распределения освещенности.

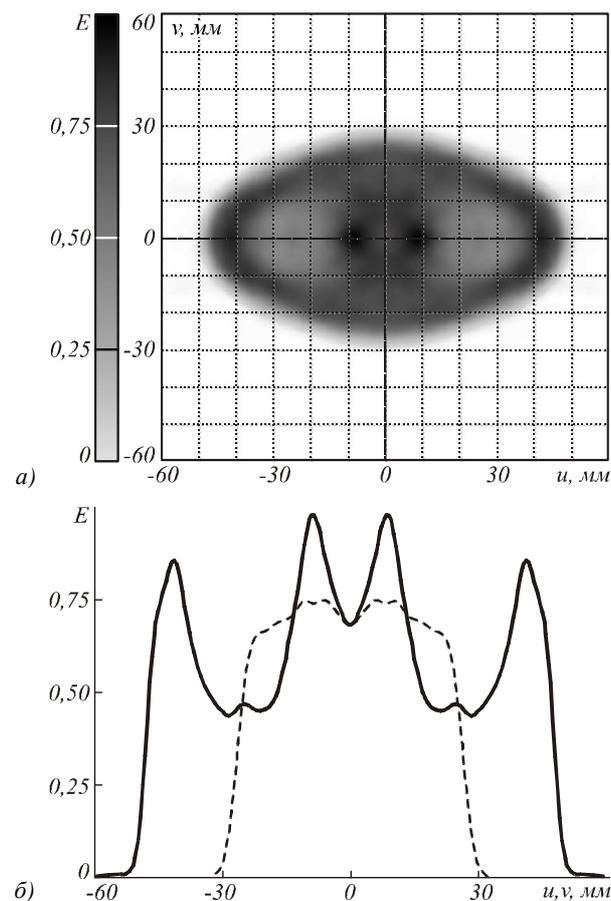


Рис. 4. Распределение освещенности, формируемое оптическим элементом, изображенным на рис. 2, от светодиода LUXEON® Rebel LXML-PW51. а) Полутоновое распределение. б) Сечения распределения освещенности: непрерывная линия – $v = 0$, штриховая линия – $u = 0$

Рассчитанная преломляющая поверхность была прооптимизирована еще раз для протяженного источника LUXEON® Rebel с помощью модифицированного метода (3), (5), (7). Оптимизация заняла менее часа на компьютере с процессором Intel® Core™2 Quad 9400 (использовались все четыре ядра). Форма и размеры оптического элемента остались практически теми же (максимальное относительное

изменение радиус-вектора составило 1,7 % от его первоначального значения). На рис. 5 изображено расчетное распределение освещенности, формируемое дополнительно прооптимизированным оптическим элементом для светодиода LUXEON® Rebel LXML-PW51. Энергетическая эффективность оптического элемента составляет порядка 73,6 %, неравномерность формируемого распределения освещенности – менее 5,7 %. Таким образом, учет размеров источника в виде (7) позволяет достичь такой же равномерности распределения, как и при точечном источнике. Следует отметить, что уменьшение энергетической эффективности по сравнению с точечным источником составляет 7 %. Это вызвано как увеличением френелевских потерь, так и некоторым «расплыванием» распределения освещенности из-за размеров источника.

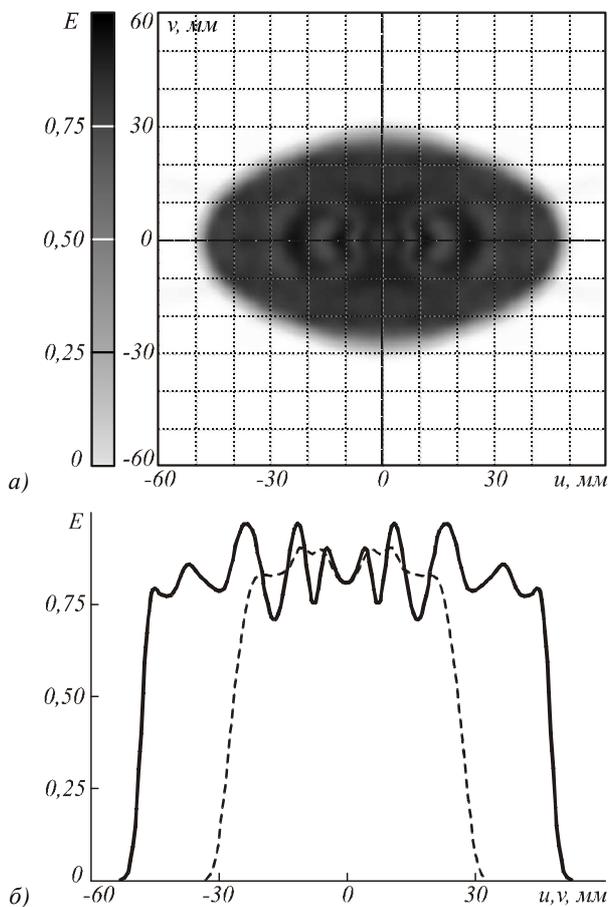


Рис. 5. Распределение освещенности, формируемое дополнительно прооптимизированным оптическим элементом, изображенным на рис. 2, от светодиода LUXEON® Rebel LXML-PW51. а) Полутоновое распределение. б) Сечения распределения освещенности: непрерывная линия – $v = 0$, штриховая линия – $u = 0$

В качестве второго примера был рассчитан оптический элемент, формирующий равномерное распределение освещенности в прямоугольной области. Размеры прямоугольника – 88×44 мм, остальные параметры такие же, как и в предыдущем примере. В этом случае отношение характерного размера ос-

вещаемой области к расстоянию до нее составляет около 6,5, что соответствует угловому размеру 145° .

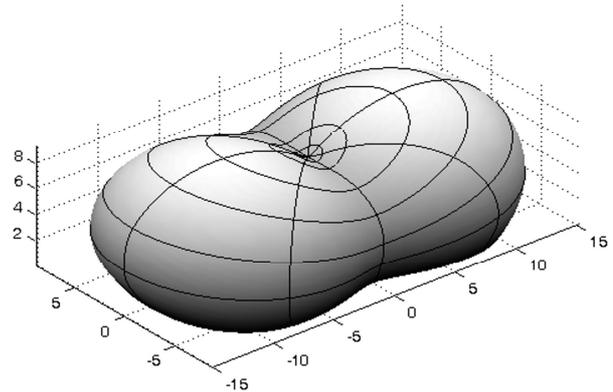


Рис. 6. Оптический элемент, формирующий равномерное распределение освещенности в прямоугольной области от точечного источника

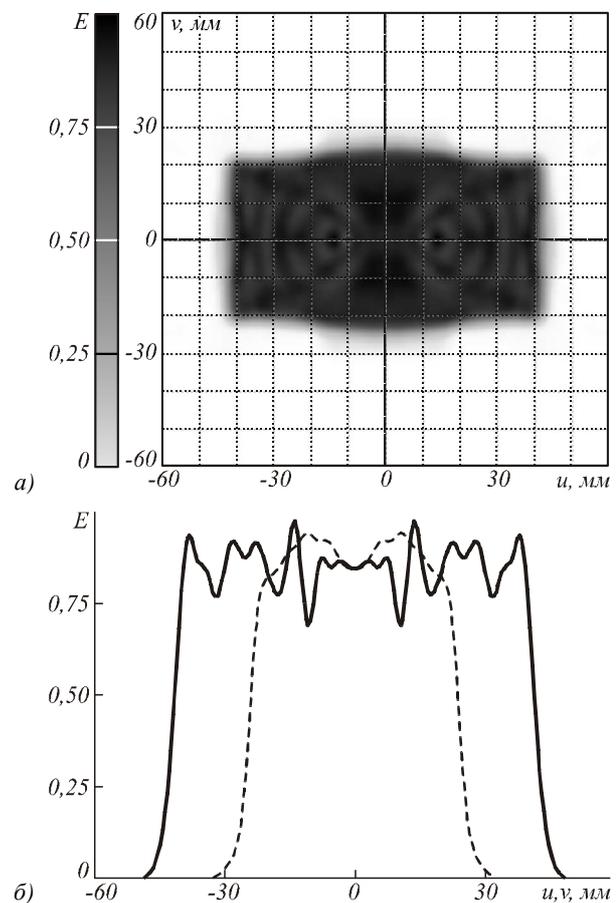


Рис. 7. Распределение освещенности, формируемое оптическим элементом, изображенным на рис. 6, от точечного источника. а) Полутоновое распределение. б) Сечения распределения освещенности: непрерывная линия – $v = 0$, штриховая линия – $u = 0$.

На рис. 6 показан оптический элемент, рассчитанный для точечного ламбертовского источника излучения с помощью немодифицированного метода [25]. Размеры оптического элемента – $29,6 \times 17,2 \times 9,5$ мм. На рис. 7 изображено распределение освещенности, формируемое преломляющей поверхностью на вы-

ходной плоскости. Энергетическая эффективность оптического элемента составляет 78,4 %, а неравномерность освещенности – менее 7,3 %.

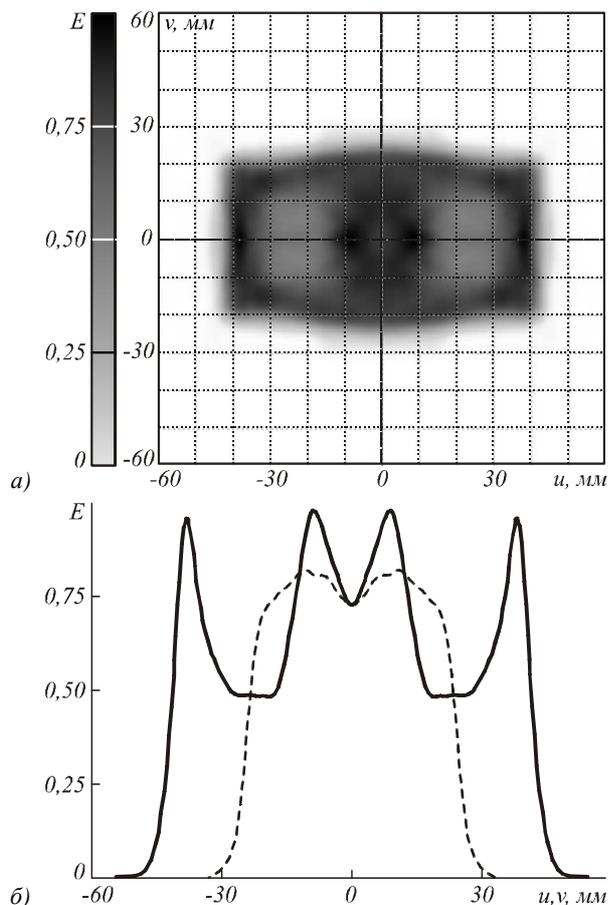


Рис. 8. Распределение освещенности, формируемое оптическим элементом, изображенным на рис. 6, от светодиода LUXEON® Rebel LXML-PW51. а) Полутоновое распределение. б) Сечения распределения освещенности: непрерывная линия – $v = 0$, штриховая линия – $u = 0$.

Как и в примере с эллипсом, рассчитанный оптический элемент сохраняет свои рабочие характеристики при размерах источника излучения менее чем $0,4 \times 0,4$ мм. На рис. 8 показано распределение освещенности, формируемое рассчитанным оптическим элементом при протяженном источнике излучения LUXEON® Rebel LXML-PW51 (размер излучающего тела 1×1 мм). Распределение освещенности на рис. 8 существенно более неравномерное, чем на рис. 7. ОСКО распределения освещенности от заданного увеличилась более чем в 2,5 раза и составляет 19,5 %. Для уменьшения ОСКО оптический элемент был дополнительно прооптимизирован с помощью модифицированного метода (3), (5), (7). Процесс оптимизации занял около часа. Форма и размеры оптического элемента практически не изменились – максимальное относительное изменение радиус-вектора составило 1,5 %. На рис. 9 изображено расчетное распределение освещенности, форми-

руемое дополнительно прооптимизированным оптическим элементом при источнике излучения LUXEON® Rebel LXML-PW51. Неравномерность освещения выходной плоскости снизилась до 6,6 %, а энергетическая эффективность практически не изменилась (77 %).

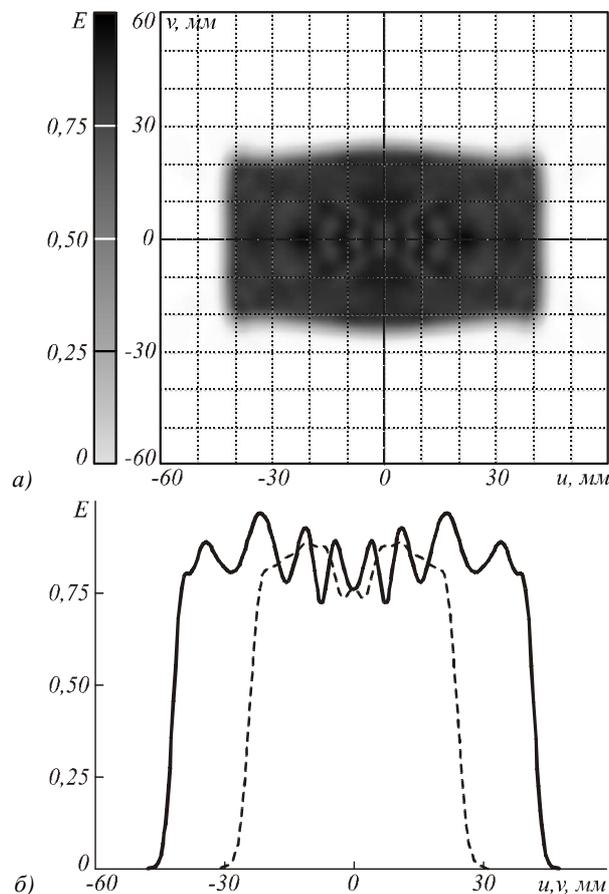


Рис. 9. Распределение освещенности, формируемое дополнительно прооптимизированным оптическим элементом, изображенным на рис. 6, от светодиода LUXEON® Rebel LXML-PW51. а) Полутоновое распределение. б) Сечения распределения освещенности: непрерывная линия – $v = 0$, штриховая линия – $u = 0$.

Заключение

Метод расчета преломляющих поверхностей, представленный в работе [25], модифицирован на случай протяженного источника излучения. Рассчитаны оптические элементы, формирующие равномерное распределение освещенности в эллиптической (полуоси 50 мм и 25 мм) и прямоугольной (88×44 мм) областях от протяженного источника излучения LUXEON® Rebel LXML-PW51 (размер излучающего тела 1×1 мм). Энергетическая эффективность оптических элементов превосходит 73 %, ОСКО распределения освещенности от заданного – менее 7,5 %. Представленные примеры подтверждают высокую работоспособность метода при расчете оптических элементов, формирующих освещаемые области с угловым размером до 145° .

Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантов Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-3086.2008.9 и НШ-7414.2010.9).

Литература

1. **Muschaweck, J.** Tailored LED lowbeam headlamps / J. Muschaweck // Laser+Photonik, 2004. – P. 26–28.
2. **Benitez, P.** Etendue Preserving Mixing and Projection Optics for High Brightness LEDs Applied to Automotive Headlamps / P. Benitez, J. Chaves, A. Cvetkovic, O. Dross, J.C. Minano, R. Mohedano // Proc. SPIE, 2006. – Vol. 6342(2).
3. **Benitez, P.** Etendue-preserving mixing and projection optics for high-luminance LEDs, applied to automotive headlamps / P. Benitez, J. Chaves, A. Cvetkovic, O. Dross, J.C. Minano, R. Mohedano // Optics Express, 2006. – Vol. 14(26). – P. 13014–13020. – ISSN: 1094-4087.
4. **Sung-II, Ch.** Microlens array diffuser for a light-emitting diode backlight system / L. Baik-Kyu, H. Sh. Dong, K. Jin-Jong, Y. Jun-Bo, K. Hongki, Ch. Sung-II // Optics Letters, 2006. – Vol. 31(20). – P. 3016–3018. – ISSN: 0146-9592.
5. **Jui-Wen, P.** Homogenized LED-illumination using microlens arrays for a pocket-sized projector / W. Chih-Ming, L. Hsiao-Chin, Ch. Jeng-Yang, P. Jui-Wen, S. Wen-Shin // Optics Express, 2007. – Vol. 15(17). – P. 10483–10491. – ISSN: 1094-4087.
6. **Pengfei, P.** On a Monge-Ampere equation arising in geometric optics / P. Pengfei, W. Xu-Jia // J. Differential Geom., 1998. – Vol. 48(2). – P. 205–223. – ISSN 0022-040X.
7. **Oliker, V.** Determining the intensities produced by reflected and refracted wave fronts in geometrical optics / E. Newman, V.I. Oliker // J. Opt. Soc. Am. A, 1995. – Vol. 12(4). – P. 784–793. – ISSN 1084-7529.
8. **Elmer, W.B.** Optical design of reflectors. Part 2 / W.B. Elmer // Applied Optics, 1978. – Vol. 17(7). – P. 977–979. – ISSN 0003-6935.
9. **Elmer, W.B.** The Optical Design of Reflectors / W.B. Elmer – N.Y.: Wiley, 1980. – 290 pp.
10. **Kusch, O.** Computer-aided optical design of illumination and irradiating devices / O. Kusch – M.: "ASLAN" Publishing House, 1993. – 192 pp.
11. **Hicks, R.A.** Designing a mirror to realize a given projection / R.A. Hicks // J. Opt. Soc. Am. A, 2005. – Vol. 22(2). – P. 323–330. – ISSN 1084-7529.
12. **Досколович, Л.Л.** Расчет формы поверхности зеркал для формирования изображения в виде линии / Л.Л. Досколович, С.И. Харитонов // Оптический журнал, 2005. – Т. 4. – С. 34–37. – ISSN 0030-4042.
13. **Doskolovich, L.L.** Designing a mirror to form a line-shaped directivity diagram / L.L. Doskolovich, N.L. Kazansky, S. Bernard // J. Mod. Opt., 2007. – Vol. 54(4). – P. 589–597. – ISSN 0950-0340.
14. **Моисеев, М.А.** Расчет радиально-симметричных преломляющих поверхностей с учетом френелевских потерь / Л.Л. Досколович, М.А. Моисеев // Компьютерная оптика, 2008. – Т. 32, № 2. – С. 201–203. – ISSN 0134-2452.
15. **Моисеев, М.А.** Расчет преломляющего оптического элемента, формирующего диаграмму направленности в виде отрезка / Л.Л. Досколович, М.А. Моисеев // Компьютерная оптика, 2008. – Т. 32, № 4. – С. 366–369. – ISSN 0134-2452.
16. **Bortz, J.** Optimal design of a nonimaging projection lens for use with an LED source and a rectangular target / J. Bortz, N. Shatz, D. Pitou // Proc. SPIE, 2000. – Vol. 4092. – P. 130–138.
17. **Ries, H.** Tailoring freeform lenses for illumination / J. Muschaweck, H. Ries // Proc. SPIE, 2001. – Vol. 4442. – P. 43–50.
18. **Ries, H.** Tailored freeform optical surfaces / J. Muschaweck, H. Ries // J. Opt. Soc. Am. A, 2002. – Vol. 19(3). – P. 590–595. – ISSN 1084-7529.
19. **Jacobson, B.A.** Lens for uniform LED illumination: an example of automated optimization using Monte Carlo ray-tracing of an LED source / B.A. Jacobson, R.D. Gendelbach // Proc. SPIE, 2001. – Vol. 4446. – P. 130–138.
20. **Parkyn, B.** Free-form illumination lens designed by a pseudo-rectangular lawnmower algorithm / B. Parkyn, D. Pelka // Proc. SPIE, 2006. – Vol. 6338.
21. **Белоусов, А.А.** Градиентный метод решения задачи фокусировки в двумерную область при протяженном источнике / А.А. Белоусов, Л.Л. Досколович // Компьютерная оптика, 2007. – Т. 31, № 3. – С. 20–26. – ISSN 0134-2452.
22. **Белоусов, А.А.** Градиентный метод расчета эйконала для фокусировки в заданную область / А.А. Белоусов, Л.Л. Досколович, С.И. Харитонов // Автометрия, 2007. – № 1. – С. 98–106. – ISSN 0320-7102.
23. **Белоусов, А.А.** Градиентный метод расчета оптических элементов для формирования заданной освещенности на криволинейной поверхности / А.А. Белоусов, Л.Л. Досколович, С.И. Харитонов // Оптический журнал, 2008. – Т. 75, № 3. – С. 30–35. – ISSN 0030-4042.
24. **Yi, D.** Freeform LED lens for uniform illumination / G. Pei-fu, L. Xu, D. Yi, Zh. Zhen-rong // Optics Express, 2008. – Vol. 16(17). – P. 12958–12966. – ISSN 1094-4087.
25. **Моисеев, М.А.** Градиентный расчет преломляющей сплайн-поверхности из условия формирования заданного распределения освещенности / Л.Л. Досколович, М.А. Моисеев // Компьютерная оптика, 2009. – Т. 33, № 1. – С. 37–42. – ISSN 0134-2452.
26. **Boor, C. De** A Practical Guide to Splines / Carl De Boor – N.Y.: Springer, 2001. – 346 pp.
27. **Gill, Ph.E.** Practical Optimization / Ph.E. Gill, W. Murray, M.H. Wright – N.Y.: Springer, 1981. – 401 pp.
28. http://lambdare.com/software_products/tracepro/ (дата обращения – 12.05.2010 г.)
29. <http://www.philipslumileds.com/pdfs/DS63.pdf> (дата обращения – 12.05.2010 г.)

References

1. **Muschaweck, J.** Tailored LED lowbeam headlamps / J. Muschaweck // Laser+Photonik, 2004. – P. 26–28.
2. **Benitez, P.** Etendue Preserving Mixing and Projection Optics for High Brightness LEDs Applied to Automotive Headlamps / P. Benitez, J. Chaves, A. Cvetkovic, O. Dross, J.C. Minano, R. Mohedano // Proc. SPIE, 2006. – Vol. 6342(2).
3. **Benitez, P.** Etendue-preserving mixing and projection optics for high-luminance LEDs, applied to automotive headlamps / P. Benitez, J. Chaves, A. Cvetkovic, O. Dross, J.C. Minano, R. Mohedano // Optics Express, 2006. – Vol. 14(26). – P. 13014–13020. – ISSN: 1094-4087.
4. **Sung-II, Ch.** Microlens array diffuser for a light-emitting diode backlight system / L. Baik-Kyu, H. Sh. Dong, K. Jin-Jong, Y. Jun-Bo, K. Hongki, Ch. Sung-II // Optics Letters, 2006. – Vol. 31(20). – P. 3016–3018. – ISSN: 0146-9592.

- ters, 2006. – Vol. 31(20). – P. 3016–3018. – ISSN: 0146-9592.
5. **Jui-Wen, P.** Homogenized LED-illumination using micro-lens arrays for a pocket-sized projector / W. Chih-Ming, L. Hsiao-Chin, Ch. Jeng-Yang, P. Jui-Wen, S. Wen-Shin // *Optics Express*, 2007. – Vol. 15(17). – P. 10483–10491. – ISSN: 1094-4087.
 6. **Pengfei, P.** On a Monge-Ampere equation arising in geometric optics / P. Pengfei, W. Xu-Jia // *J. Differential Geom.*, 1998. – Vol. 48(2). – P. 205–223. – ISSN 0022-040X.
 7. **Oliker, V.** Determining the intensities produced by reflected and refracted wave fronts in geometrical optics / E. Newman, V.I. Oliker // *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995. – Vol. 12(4). – P. 784–793. – ISSN 1084-7529.
 8. **Elmer, W.B.** Optical design of reflectors. Part 2 / W.B. Elmer // *Applied Optics*, 1978. – Vol. 17(7). – P. 977–979. – ISSN 0003-6935.
 9. **Elmer, W.B.** The Optical Design of Reflectors / W.B. Elmer – N.Y.: Wiley, 1980. – 290 pp.
 10. **Kusch, O.** Computer-aided optical design of illumination and irradiating devices / O. Kusch – M.: "ASLAN" Publishing House, 1993. – 192 pp.
 11. **Hicks, R.A.** Designing a mirror to realize a given projection / R.A. Hicks // *J. Opt. Soc. Am. A*, 2005. – Vol. 22(2). – P. 323–330. – ISSN 1084-7529.
 12. **Doskolovich, L.L.** Calculating the surface shape of mirrors for shaping an image in the form of a line / L.L. Doskolovich, S.I. Kharitonov // *J. Opt. Tech.*, 2005. – Vol. 72(4). – P. 318–321. – ISSN 1070-9762.
 13. **Doskolovich, L.L.** Designing a mirror to form a line-shaped directivity diagram / L.L. Doskolovich, N.L. Kazansky, S. Bernard // *J. Mod. Opt.*, 2007. – Vol. 54(4). – P. 589–597. – ISSN 0950-0340.
 14. **Doskolovich, L.L.** Designing radially symmetric refractive surfaces with regard for Fresnel losses / L.L. Doskolovich, M.A. Moiseev // *Computer Optics*, 2008. – Vol. 32(1). – P. 201–203. – (in Russian). – ISSN 0134-2452.
 15. **Doskolovich, L.L.** Calculations for refracting optical elements for forming directional patterns in the form of a rectangle / L.L. Doskolovich, M.A. Moiseev // *J. Opt. Tech.*, 2009. – Vol. 76(7). – P. 430–434. – ISSN 0134-2452.
 16. **Bortz, J.** Optimal design of a nonimaging projection lens for use with an LED source and a rectangular target / J. Bortz, N. Shatz, D. Pitou // *Proc. SPIE*, 2000. – Vol. 4092. – P. 130–138.
 17. **Ries, H.** Tailoring freeform lenses for illumination / J. Muschaweck, H. Ries // *Proc. SPIE*, 2001. – Vol. 4442. – P. 43–50.
 18. **Ries, H.** Tailored freeform optical surfaces / J. Muschaweck, H. Ries // *J. Opt. Soc. A*, 2002. – Vol. 19(3). – P. 590–595. – ISSN 1084-7529.
 19. **Jacobson, B.A.** Lens for uniform LED illumination: an example of automated optimization using Monte Carlo ray-tracing of an LED source / B.A. Jacobson, R.D. Gendelbach // *Proc. SPIE*, 2001. – Vol. 4446. – P. 130–138.
 20. **Parkyn, B.** Free-form illumination lens designed by a pseudo-rectangular lawnmower algorithm / B. Parkyn, D. Pelka // *Proc. SPIE*, 2006. – Vol. 6338.
 21. **Belousov, A.A.** A gradient method for solving problem of focusing light from extended source to the 2D region / A.A. Belousov, L.L. Doskolovich // *Computer Optics*. – 2007. – Vol. 31(3). – P. 20–26. – (in Russian). – ISSN 0134-2452.
 22. **Belousov, A.A.** A gradient method of eikonal calculating for focusing in the prescribed region / A.A. Belousov, L.L. Doskolovich, S.I. Kharitonov // *Avtometriya*. – 2007. – Vol. 1. – P. 98–106. – (in Russian). – ISSN 0320-7102.
 23. **Belousov, A.A.** A gradient method of designing optical elements for forming a specified irradiance on a curved surface / A.A. Belousov, L.L. Doskolovich, S.I. Kharitonov // *J. Opt. Tech.*, 2008. – Vol. 75(3). – P. 161–165. – ISSN 0134-2452.
 24. **Yi, D.** Freeform LED lens for uniform illumination / G. Pei-fu, L. Xu, D. Yi, Zh. Zhen-rong // *Optics Express*, 2008. – Vol. 16(17). – P. 12958–12966. – ISSN 1094-4087.
 25. **Doskolovich, L.L.** Gradient calculation of refracting B-spline surface generating prescribed irradiance distribution / L.L. Doskolovich, M.A. Moiseev // *Computer Optics*. – 2009. – Vol. 33(1). – P. 37–42. – (in Russian). – ISSN 0134-2452.
 26. **Boor, C. De** A Practical Guide to Splines / Carl De Boor – N.Y.: Springer, 2001. – 346 pp.
 27. **Gill, Ph.E.** Practical Optimization / Ph.E. Gill, W. Murray, M.H. Wright – N.Y.: Springer, 1981. – 401 pp.
 28. http://lambdare.com/software_products/tracepro/
 29. <http://www.philipslumileds.com/pdfs/DS63.pdf>

DESIGN OF REFRACTIVE OPTICAL ELEMENT PRODUCING REQUIRED IRRADIANCE DISTRIBUTION FOR EXTENDED LIGHT SOURCE

M. A. Moiseev, L. L. Doskolovich

*Samara State Aerospace University named after S.P. Korolev,
Image Processing Systems Institute of RAS*

Abstract

A method for design of refractive optical element producing the prescribed irradiance distribution with large angular dimensions from extended light source is presented. The method is based on the gradient optimization of the refractive surface represented as a bicubic spline in spherical coordinates. The optical elements that produce uniform irradiance distribution in the elliptic and rectangular regions for point and extended light sources are computed. The energy efficiency of the optical elements is more than 73 %; the non-uniformity of the generated irradiance distribution is less than 7.5 %. The ratio of the illuminated region size to the thickness of the optical system is about 6.5. This value is twice as large as that for the optical elements presented in available publications.

Key words: optical element design, uniform irradiance, light-emitting diode, gradient method.

Сведения об авторах

Досколович Леонид Леонидович, доктор физико-математических наук, профессор Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева; ведущий научный сотрудник Учреждения Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН. E-mail: *leonid@smr.ru*

Область научных интересов: дифракционная оптика, лазерные информационные технологии, нанопотоника.

Leonid Leonidovich Doskolovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Professor of the Samara State Aerospace University named after S.P. Korolev. Leading researcher of the Image processing systems institute of the RAS. E-mail: *leonid@smr.ru*.

Research interests: diffraction optics, laser information technologies, nanophotonics.



Моисеев Михаил Александрович, инженер НИЛ-35 Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева, стажер-исследователь Учреждения Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН. Ученой степени не имеет. E-mail: *mikhail@smr.ru*

Область научных интересов: обратные задачи расчета светотехнических устройств.

Mikhail Alexandrovich Moiseev, engineer of NIL-35 of the Samara State Aerospace University named after S.P. Korolev, probationer-researcher of the Image Processing Systems Institute of the RAS. Academic degree: none. E-mail: *mikhail@smr.ru*

Research interests: inverse problem of nonimaging optics design.

Поступила в редакцию 4 февраля 2010 г.