

РАСЧЕТ ЭКСТРУДИРОВАННЫХ ПРЕЛОМЛЯЮЩИХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ, ФОРМИРУЮЩИХ ЗАДАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ

К.В. Андреева^{1,2}, Е.С. Андреев^{1,2}, М.А. Моисеев^{1,2}, С.В. Кравченко^{1,2}, Е.В. Бызов^{1,2}, Л.Л. Досколович^{1,2}

¹ Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия,

² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

Аннотация

В данной работе представлен оптимизационный метод для расчёта экструдированных оптических элементов светодиодов с двумя преломляющими поверхностями из условия формирования заданных распределений интенсивности. Метод основан на использовании разработанной процедуры быстрой трассировки лучей, в которой используется аппроксимация оптических поверхностей набором плоскостей, и учитывает протяженный характер источника излучения. Световая эффективность рассчитанных примеров оптических элементов выше 89 %, а среднеквадратичное отклонение формируемого распределения освещённости от заданного не превышает 2 %.

Ключевые слова: оптический элемент светодиода, вторичная оптика, трассировка, оптимизация оптической поверхности.

Цитирование: Андреева, К.В. Расчет экструдированных преломляющих оптических элементов, формирующих заданные распределения интенсивности / К.В. Андреева, Е.С. Андреев, М.А. Моисеев, С.В. Кравченко, Е.В. Бызов, Л.Л. Досколович // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 6. – С. 812-819. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-812-819.

Введение

В последние годы проблема энергосбережения приобретает большое значение из-за растущего спроса на электроэнергию и ожидаемого увеличения ее потребления. Основной целью развития светотехники на данном этапе является увеличение светового потока источника света при уменьшении энергетических потерь. Поэтому задача проектирования энергоэффективных светотехнических систем на основе светодиодов является одной из актуальных научных проблем светотехники. Для эффективного применения светодиодов в современных светотехнических устройствах используют вторичную оптику – преломляющие или отражающие оптические элементы, формирующие заданное световое распределение.

Расчёт оптических элементов является обратной задачей геометрической оптики и заключается в определении формы поверхности оптического элемента из условия создания требуемого распределения освещённости или интенсивности. Даже в случае точечного источника излучения и одной оптической поверхности данная задача сводится к решению нелинейного дифференциального уравнения в частных производных второго порядка типа Монжа–Ампера [1–2]. Аналитические уравнения, описывающие поверхности таких оптических элементов, были получены только для узкого круга задач, обладающих радиальной или осевой симметрией [3–5].

Одной из основных сфер применимости светодиодной оптики является промышленное, складское и магазинное освещение. Как правило, при решении таких задач используются оптические элементы с одной [6] или несколькими преломляющими поверхностями [7, 8], а также отражающие оптические элементы [9]. В последнее время в задачах промышленного, складского и магазинного освещения ввиду низкой стоимости изготовления большую популяр-

ность получили экструдированные оптические элементы [10]. Экструдированными называют оптические элементы, полученные методом экструзии – технологии изготовления изделий путём продавливания высоковязкого материала на основе расплава через формующий инструмент с целью получения изделия с поперечным сечением нужной формы. Несмотря на большое количество коммерческих предложений и патентов [11–13], в опубликованных и известных авторам работах до сих пор не было представлено ни одного метода для расчета экструдированных оптических элементов.

В данной работе представлен метод расчёта экструдированных оптических элементов с двумя рабочими преломляющими поверхностями из условия формирования заданного профиля интенсивности от протяженного источника света.

1. Постановка задачи

Рассмотрим задачу расчета экструдированного оптического элемента с двумя преломляющими поверхностями (рис. 1), формирующего заданную кривую силы света в поперечной плоскости $I(\varphi)$ от протяженного источника света, центр которого расположен в начале координат. Оптический элемент обладает продольной симметрией, то есть имеет одинаковое поперечное сечение для любой координаты z . Таким образом, расчет поверхностей оптического элемента сводится к определению его профиля.

Задачу расчета профиля оптического элемента будем решать путем восстановления поверхности по известной функции лучевого соответствия $\beta(\varphi)$, которая устанавливает зависимость между угловой координатой φ луча, вышедшего из источника, и угловой координатой φ луча, вышедшего из оптического элемента.

С учетом продольной симметрии рассматриваемой задачи закон сохранения светового потока может быть записан в следующем виде:

$$I_0(\varphi) d\varphi = I(\beta(\varphi)) d\beta(\varphi), \tag{1}$$

где $I_0(\varphi)$ – интенсивность выходящего из источника светового потока. Таким образом, функция лучевого соответствия может быть определена из решения следующего дифференциального уравнения в полных производных:

$$\frac{d\beta(\varphi)}{d\varphi} = \frac{I_0(\varphi)}{I(\beta(\varphi))}. \tag{2}$$

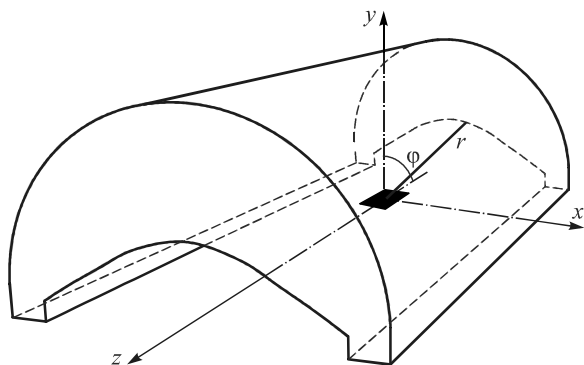


Рис. 1. Взаимное расположение экструдированного оптического элемента и источника света в пространстве

2. Метод расчета экструдированного оптического элемента в приближении точечного источника

Профиль поверхностей оптического элемента представлен на рис. 2.

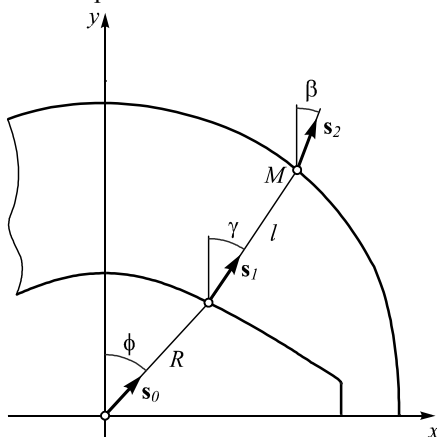


Рис. 2. Преломление лучей оптическим элементом

Будем искать решение для внутренней преломляющей поверхности из условия сужения падающего на неё светового пучка. Под сужением будем понимать следующее преобразование светового потока:

$$\gamma(\varphi) = k(\beta - \varphi) + \varphi, \tag{3}$$

где γ – угловая координата луча после преломления на внутренней поверхности, а $k \in [0, 1]$ – коэффициент, определяющий соотношение по распределению работы между внутренней и внешней поверхностями оптического элемента.

Для нахождения профиля внутренней преломляющей поверхности запишем дифференциальное уравнение для модуля её радиус-вектора $R(\varphi)$ [14]:

$$\frac{dR(\varphi)}{d\varphi} = -R(\varphi) \frac{\sin(\varphi - \gamma(\varphi))}{(1/n) - \cos(\varphi - \gamma(\varphi))}, \tag{4}$$

где n – показатель преломления оптического элемента.

Согласно геометрии задачи (рис. 2), радиус-вектор внешней поверхности $r(\varphi)$ определяется уравнением:

$$\mathbf{r}(\varphi) = \mathbf{R}(\varphi) + l(\varphi) \cdot \mathbf{s}_1(\varphi), \tag{5}$$

где $l(\varphi)$ – расстояние между внутренней и внешней поверхностями оптического элемента вдоль направления луча, а $\mathbf{s}_1(\varphi)$ – направляющий вектор луча, преломлённого на внутренней поверхности.

Для определения профиля внешней поверхности запишем уравнение наклонов в точке $M(\varphi) = (x(\varphi), y(\varphi))$ [15]:

$$\frac{d\Psi(\varphi)}{d\varphi} = s_{2x} \cdot \frac{dx}{d\varphi} + s_{2y} \cdot \frac{dy}{d\varphi}, \tag{6}$$

где $\Psi(\varphi)$ – это функция эйконала на внешней поверхности оптического элемента, а $\mathbf{s}_2(\varphi) = (\sin(\beta(\varphi)), \cos(\beta(\varphi)))$ – направляющий вектор луча, преломлённого на внешней поверхности.

Согласно определению, функция эйконала численно равна длине оптического пути луча $\Psi = R(\varphi) + nl(\varphi)$, тогда левую часть уравнения (6) можно записать в виде:

$$\frac{d\Psi}{d\varphi} = \frac{dR(\varphi)}{d\varphi} + n \frac{dl(\varphi)}{d\varphi}. \tag{7}$$

Координаты точки $M(\varphi) = (x(\varphi), y(\varphi))$ могут быть выражены из векторного уравнения (5):

$$\begin{aligned} x(\varphi) &= R(\varphi) \sin(\varphi) + l(\varphi) \cdot \sin(\gamma(\varphi)), \\ y(\varphi) &= R(\varphi) \cos(\varphi) + l(\varphi) \cdot \cos(\gamma(\varphi)). \end{aligned} \tag{8}$$

Подставив выражения (7) и (8) в уравнение (6) и выразив производную $dl(\varphi)/d\varphi$, получим:

$$\frac{dR}{d\varphi} = \frac{\frac{dR}{d\varphi} \cos(\varphi - \beta) - R \sin(\varphi - \beta) - \frac{d\gamma}{d\varphi} l \sin(\gamma - \beta) - \frac{dR}{d\varphi}}{n - \cos(\beta - \gamma)}. \tag{9}$$

Таким образом, задача расчёта экструдированного оптического элемента с двумя преломляющими поверхностями в случае точечного источника света была сведена к решению трёх независимых линейных дифференциальных уравнений в полных производных (2), (4) и (9). Данная операция может быть выполнена с помощью численного интегрирования, например, с помощью метода Рунге–Кутты [16].

3. Оптимизационный метод расчета экструдированного оптического элемента при протяженном источнике излучения

Описанный выше метод был разработан в приближении точечного источника, однако при расчете компактных оптических элементов использование данного приближения некорректно. Далее рассматривается оптимизационный метод расчета экструдиро-

ванного оптического элемента, учитывающий протяженный характер источника.

Сформулируем задачу расчета оптического элемента как задачу минимизации относительного среднеквадратического отклонения (ОСКО) формируемого распределения интенсивности в поперечной плоскости от требуемого:

$$\varepsilon(\mathbf{c}) = \frac{1}{\bar{I}} \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} (I_{calc}(\varphi, \mathbf{c}) - I(\varphi))^2 d\varphi}, \quad (10)$$

где $I(\varphi)$ – требуемое распределение интенсивности в поперечной плоскости, \bar{I} – её среднее значение, $I_{calc}(\varphi, \mathbf{c})$ – распределение интенсивности в поперечной плоскости, формируемое оптическим элементом с вектором параметров \mathbf{c} .

В качестве начального приближения будем использовать оптический элемент, полученный для точечного источника в результате решения дифференциальных уравнений (2), (4) и (9).

Затем параметризуем профили внешней и внутренней преломляющих поверхностей оптического элемента кубическими сплайнами. Тогда параметрами задачи оптимизации будут значения радиус-векторов поверхностей, а также их первые производные в узлах сплайновой сетки.

Во время оптимизации многократно вычисляется функция ошибки (10). Для вычисления формируемого распределения интенсивности вызывается процедура трассировки лучей [17]. Данная процедура имеет высокую сложность и, как правило, занимает порядка десяти минут для 100 000 лучей. Для ускорения оптимизационного процесса был разработан новый метод трассировки лучей, имеющий меньшую вычислительную сложность по сравнению с традиционными методами и учитывающий экструдированную геометрию оптических элементов.

4. Быстрая техника трассировки лучей через экструдированные оптические элементы

Процедура трассировки лучей заключается в многократном поиске пересечений лучей с оптическими поверхностями и дальнейшем построении хода лучей в соответствии с законами геометрической оптики. Следует заметить, что основное время выполнения процедуры трассировки лучей приходится на поиск точек пересечений лучей с оптическими поверхностями.

Для сокращения времени моделирования поверхности оптических элементов, как правило, аппроксимируются набором примитивов. Например, в коммерческом программном обеспечении TracePro® в качестве примитивов используются NURBS-сплайны [18], позволяющие выполнить аппроксимацию оригинальной поверхности с достаточно высокой точностью. Другой распространённый метод трассировки лучей заключается в представлении поверхностей набором треугольников. Однако оба этих способа оказываются неэффективными для моделирования работы экструдированных оптических элементов, так как для точно-

го представления оптических поверхностей требуется достаточно большое количество примитивов.

В данной работе была разработана процедура трассировки лучей, учитывающая протяженный характер экструдированных элементов и позволяющая с высокой скоростью оценивать формируемые ими световые распределения. В основе предложенной процедуры лежит представление оптического элемента набором плоскостей. В этом случае для точного представления оптических поверхностей достаточно нескольких десятков примитивов, а оценка формируемого распределения занимает менее одной секунды.

Для представления экструдированного оптического элемента набором плоскостей аппроксимируем профиль каждой из поверхностей ломаной линией с заданной точностью δ , согласно алгоритму, представленному в работе [19].

После определения узлов разбиения (x_i, y_i) набор примитивов (плоскостей) можно задать в параметрическом виде следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_i &= \mathbf{q}_{0,i} + s\mathbf{v}_i + t\mathbf{w}, \\ \mathbf{q}_{0,i} &= (x_i, y_i, z_i), \\ \mathbf{v}_i &= (x_{i+1} - x_i, y_{i+1} - y_i, 0), \\ \mathbf{w} &= (0, 0, 1), \end{aligned} \quad (11)$$

где s и t – произвольные параметры, причем $s \in [0, 1]$ – данное ограничение определяет границы i -го примитива; \mathbf{v} и \mathbf{w} – направляющие векторы плоскости (рис. 3).

Поиск точки пересечения луча и i -го примитива сводится к решению следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_i &= \mathbf{q}_{0,i} + s\mathbf{v}_i + t\mathbf{w}, \\ x &= x_0 + \tau s_x, \\ y &= y_0 + \tau s_y, \\ z &= z_0 + \tau s_z, \end{aligned} \quad (12)$$

где (x_0, y_0, z_0) – это координаты начала луча, а (s_x, s_y, s_z) – координаты его единичного вектора.

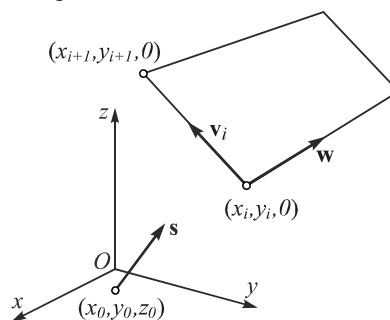


Рис. 3. Взаимное расположение i -го примитива и луча

Решая данную систему, найдем параметр τ , а следовательно, и точку пересечения луча и i -го примитива:

$$\tau = \frac{(y_i - x_i)(y_{i+1} - y_i) - (y_0 - kx_0)}{s_y - ks_x}, \quad (13)$$

где $k = (y_{i+1} - y_i) / (x_{i+1} - x_i)$.

Для вырожденных случаев вертикальных сегментов, когда $x_{i+1} = x_i$, параметр τ легко определить из второго уравнения системы (12):

$$\tau = \frac{x_i - x_0}{s_x}, \quad y \in [y_i, y_{i+1}]. \quad (14)$$

Таким образом, вычисление точки пересечения сводится к решению линейного уравнения, как и в случае с треугольными примитивами, однако общее время трассировки уменьшается на несколько порядков в связи с меньшим числом примитивов.

5. Результаты моделирования

Предложенный метод расчёта экструдированных оптических элементов с двумя преломляющими поверхностями был реализован в среде программирования Matlab. Рассмотрим примеры, иллюстрирующие работоспособность и эффективность данного подхода.

В качестве первого примера был рассчитан оптический элемент, формирующий равномерный профиль интенсивности с угловым размером $\beta_{bound} = 120^\circ$ от протяженного источника света с характерным размером 3×3 мм, излучающим свет по закону Ламберта. В этом случае функция лучевого соответствия определяется из уравнения (1) и имеет простой аналитический вид:

$$\beta(\varphi) = \frac{\beta_{bound}}{2} \sin(\varphi). \quad (15)$$

На рис. 4 представлен профиль оптического элемента, рассчитанный в приближении точечного источника света. На рис. 5 приведена диаграмма направленности, формируемая рассчитанным оптическим элементом и полученная при трассировке 500 000 лучей в программном обеспечении Trace Pro. Световая эффективность полученного решения составляет 90,1 %, а ОСКО формируемого распределения составляет 1,1 % от равномерного.

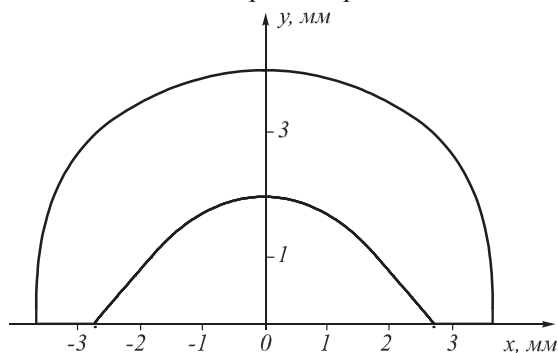


Рис. 4. Профиль рассчитанного оптического элемента, формирующего равномерный профиль интенсивности в поперечной плоскости

Оптический элемент также был промоделирован с протяженным источником света с размерами 3×3 мм, излучающими по закону Ламберта. Результаты моделирования, полученные при моделировании 500 000 лучей, приведены на рис. 6. Эффективность оптического элемента снизилась до 89,5 %, а ОСКО формируемого распределения от равномерного стала равной 6,4 %.

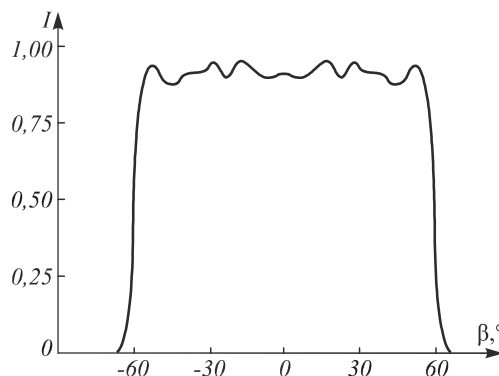


Рис. 5. Диаграмма направленности, формируемая оптическим элементом (рис. 4) для точечного источника света в поперечной плоскости

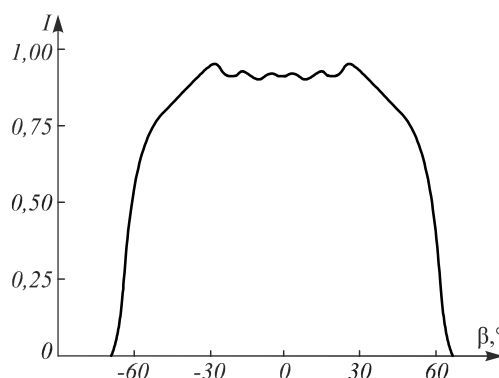


Рис. 6. Диаграмма направленности, формируемая оптическим элементом в поперечной плоскости для источника света с характерным размером 3×3 мм

Для улучшения формируемого распределения профиль оптического элемента был прооптимизирован. Для этого внешняя поверхность профиля была аппроксимирована кубическим сплайном с 3 сегментами, внутренняя поверхность в оптимизации не участвовала. С учетом симметрии задача оптимизации содержала 5 параметров, так как производная вершины была зафиксирована.

Время расчета составило 9 минут на компьютере с процессором Intel® Core™ 2 Quad Q8300. За это время процедура трассировки лучей была вызвана 756 раз. Таким образом, среднее время расчета формируемого распределения составляет 0,71 секунды. Для сравнения процедура трассировки аналогичной оптической сцены в программном обеспечении Trace Pro составляет 4 минуты 16 секунд.

Результаты моделирования прооптимизированного оптического элемента представлены на рис. 7. Эффективность полученного решения составила 91,0 %, а ОСКО — 2,1 %.

В качестве второго примера был рассчитан оптический элемент, формирующий равномерный профиль освещенности с угловым размером $\beta_{bound} = 75^\circ$ в выходной плоскости, расположенной на высоте 1000 м от поверхности светодиода, требуемая диаграмма направленности в этом случае имеет следующий вид (рис. 8). В качестве светодиода в примере использовался светодиод Cree XPG с размерами $3 \times 3 \times 1,5$ мм.

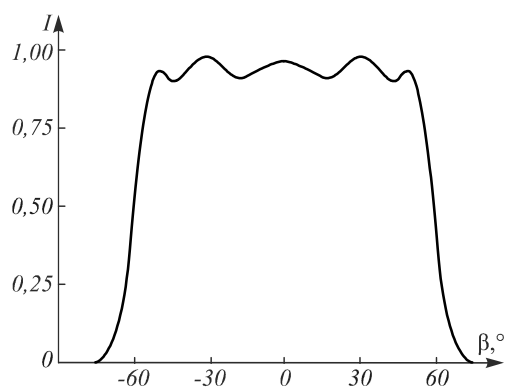


Рис. 7. Диаграмма направленности, формируемая прооптимизированным оптическим элементом в поперечной плоскости с источником света с характерным размером 3×3 мм

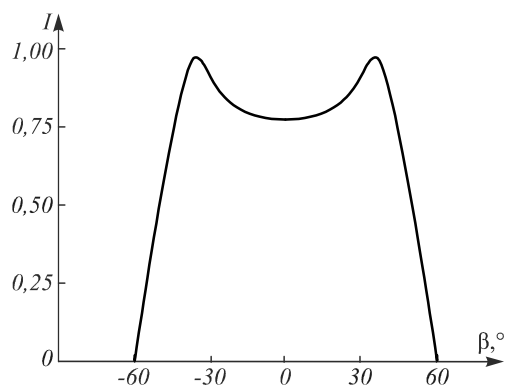


Рис. 8. Требуемая диаграмма направленности, соответствующая равномерному распределению освещенности в поперечном профиле

Как и в предыдущем случае, начальное приближение было рассчитано в приближении точечного источника света путем численного решения уравнений (2), (4) и (9). Затем профиль оптического элемента был представлен кубическими сплайнами с двумя сегментами для внутренней поверхности и тремя сегментами для внешней.

На рис. 9 представлен профиль прооптимизированного оптического элемента.

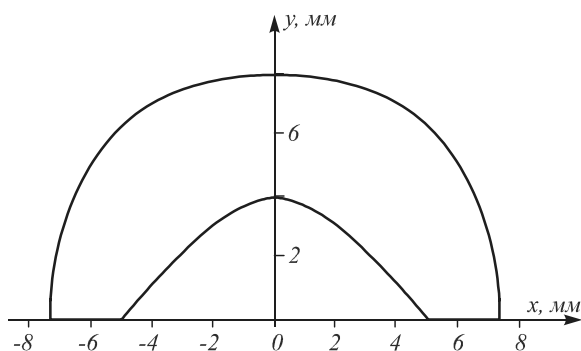


Рис. 9. Профиль рассчитанного оптического элемента, формирующего равномерный профиль освещенности

Заключение

В данной работе представлен новый оптимизационный метод расчёта экструдируемых оптических элементов с двумя преломляющими поверхностями.

На рис. 10 приведена формируемая им диаграмма направленности, полученная при трассировке 500 000 лучей в программном обеспечении Trace Pro. Световая эффективность полученного решения составляет 89,1 %, ОСКО формируемого распределения составляет 0,5 % от равномерного.

Представленные выше примеры демонстрируют хорошую работоспособность предложенного метода расчёта экструдируемых оптических элементов для формирования заданных распределений интенсивности от протяженного источника света.

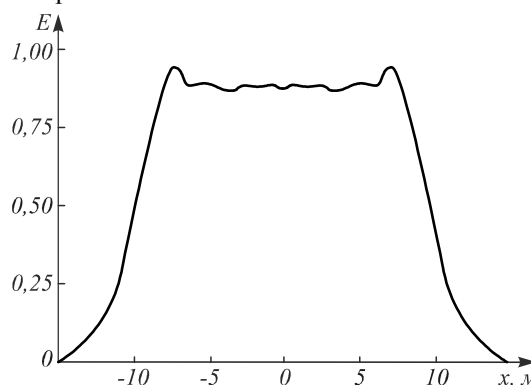


Рис. 10. Профили распределения освещенности в поперечной плоскости, формируемого оптическим элементом, представленным на рис. 9

Для расчёта начального приближения получено точное решение данной задачи для случая точечного источника. Предложена процедура быстрой трассировки лучей, основанная на аппроксимации поверхностей элемента набором плоскостей. Использование разработанной процедуры трассировки в оптимизационном методе при вычислении функции ошибки позволяет оценить формируемое распределение освещенности за 0,71 секунды, что существенно сокращает время оптимизации. С помощью разработанного метода были рассчитаны и промоделированы экструдируемые оптические элементы, формирующие заданные кривые силы света в поперечной плоскости. Относительное среднеквадратичное отклонение формируемых распределений не превышает 2,1 % от заданного, а световая эффективность оптических элементов составляет более 89,0 %, что свидетельствует о хорошей работоспособности предложенного метода.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №17-47-630164.

Литература

1. **Wu, R.** Freeform illumination design: a nonlinear boundary problem for the Monge–Ampère equation / R. Wu, L. Xu, P. Liu, Y. Zhang, Z. Zheng, H. Li, X. Liu // Optics Letters. – 2013. – Vol. 38, Issue 2. – P. 229-231. – DOI: 10.1364/OL.38.000229.
2. **Wu, R.** Influence of the characteristics of a light source and target on the Monge–Ampère equation method in freeform optics design / R. Wu, P. Benítez, Y. Zhang, J.C. Miñano // Optics Letters. – 2014. – Vol. 39, Issue 3. – P. 634-637. – DOI: 10.1364/OL.39.000634.

3. **Кравченко, С.В.** Расчёт осесимметричных оптических элементов с двумя асферическими поверхностями для формирования заданных распределений освещённости / С.В. Кравченко, М.А. Моисеев, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 4. – С. 467-472.
4. **Oliker, V.I.** Radially symmetric solutions of a Monge-Ampere equation arising in the reflector mapping problem / V.I. Oliker, P. Waltman // Proceedings of the UAB International Conference on Differential Equations and Mathematical Physics, Lecture Notes in Math. – 1987. – P. 361-374.
5. **Moiseev, M.A.** Fast and robust technique for design of axisymmetric TIR optics in case of an extended light source / M.A. Moiseev, L.L. Doskolovich, K.V. Borisova, E.V. Byzov // Journal of Modern Optics. – 2013. – Vol. 60(14). – P. 1100-1106. – DOI: 10.1080/09500340.2013.844864.
6. **Luo, Y.** Design of compact and smooth free-form optical system with uniform illuminance for LED source / Y. Luo, Z. Feng, Y. Han, H. Li // Optics Express. – 2010. – Vol. 18, Issue 9. – P. 9055-9063. – DOI: 10.1364/OE.18.009055.
7. **Liu, P.** Uniform illumination design by configuration of LEDs and optimization of LED lens for large-scale color-mixing applications / P. Liu, H. Wang, R. Wu, Y. Yang, Y. Zhang, Z. Zheng, H. Li, X. Liu // Applied Optics. – 2013. – Vol. 52, Issue 17. – P. 3998-4005. – DOI: 10.1364/AO.52.003998.
8. **Moiseev, M.A.** Design of high-efficient freeform LED lens for illumination of elongated rectangular regions / M.A. Moiseev, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // Optics Express. – 2011. – Vol. 19, Issue 53. – P. A225-A233. – DOI: 10.1364/OE.19.00A225.
9. **Chen, E.** Design of LED-based reflector-array module for specific illuminance distribution / E. Chen, F. Yu // Optics Communications. – 2013. – Vol. 289. – P. 19-27. – DOI: 10.1016/j.optcom.2012.09.082.
10. **Tadmor, Z.** Engineering principles of plasticating extrusion / Z. Tadmor, I. Klein. – New York: Van Nostrand Reinhold Inc., 1970. – 500 p. – ISBN: 978-0442156350.
11. **U.S. Patent 8,602,604 F21V 3/00, 362/311.02, 362/257.** Extruded wide angle lens for use with a LED light source / J.X. Zhang, C.H. Lowery, US 12/904,551, filed of October 14, 2010, published of December 10, 2013.
12. **U.S. Patent 7,273,299 F21V 5/00, 362/244, 362/335, 362/246, 362/249.01.** Cylindrical irradiance-mapping lens and its applications to LED shelf-lighting / W.A. Parkyn, D.G. Pelka, US 11/332,738, filed of January 17, 2006, published of September 25, 2007.
13. **U.S. Patent 7,559,672 F21V 5/00, 362/244, 362/127, 362/92.** Linear illumination lens with Fresnel facets / W.A. Parkyn, D.G. Pelka, US 12/126,843, filed of May 23, 2008, published of July 14, 2009.
14. **Досколович, Л.Л.** Расчёт радиально-симметричных преломляющих поверхностей с учётом френелевских потерь / Л.Л. Досколович, М.А. Моисеев // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32, № 2. – С. 201-203.
15. **Досколович, Л.Л.** ДОЭ для формирования диаграммы направленности в виде линии / Л.Л. Досколович, С.И. Харитонов, О.И. Петрова // Компьютерная оптика. – 2002. – Т. 24. – С. 40-42.
16. **Бахвалов, Н.С.** Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – 6 изд. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2001. – 636 с. – ISBN: 5-94774-060-5.
17. **Андреев, Е.С.** Трассировка лучей методом Монте-Карло через осесимметричные оптические элементы с использованием к-мерного дерева / Е.С. Андреев, М.А. Моисеев, К.В. Борисова, Л.Л. Досколович // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 3. – С. 357-362. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-3-357-362.
18. **Keys, R.G.** Cubic convolution interpolation for digital image processing / R.G. Keys // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. – 1981. – Vol. 29, Issue 6. – P. 1153-1160. – DOI: 10.1109/TASSP.1981.1163711.
19. **Моисеев, М.А.** Оптимизационный метод для расчёта TIR оптических элементов, включающий процедуру быстрой трассировки лучей / М.А. Моисеев, К.В. Борисова, Е.В. Бызов, Л.Л. Досколович // Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37, № 1. – С. 51-58.

Сведения об авторах

Андреева Ксения Валерьевна, 1992 года рождения. В 2016 году с отличием окончила Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева по направлению «Прикладные математика и физика». Область научных интересов: расчет оптических элементов светодиодов. E-mail: ksen.v.andreeva@gmail.com.

Андреев Евгений Сергеевич, 1992 года рождения. В 2016 году с отличием окончил Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева по направлению «Прикладные математика и физика». Аспирант второго года обучения Самарского университета. E-mail: gsomix@gmail.com.

Моисеев Михаил Александрович, 1986 года рождения, в 2008 году с отличием окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (ныне Самарский университет) по специальности 010600 «Прикладные математика и физика». Кандидат физико-математических наук (2011 год), работает научным сотрудником в Лаборатории дифракционной оптики ИСОИ РАН – филиале ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Является членом международного научного общества SPIE. М.А. Моисеев – специалист в области решения обратных задач геометрической оптики. В списке научных работ М.А. Моисеева 35 статей и 7 авторских свидетельств. E-mail: mikhail@smr.ru.

Кравченко Сергей Васильевич, 1991 года рождения. В 2014 году с отличием окончил обучение в магистратуре Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (ныне Самарский университет) по направлению «Прикладные математика и физика». Является членом международного научного общества SPIE. В списке научных трудов С.В. Кравченко 18 публикаций. E-mail: sergey.kravchenko91@gmail.com.

Бызов Егор Владимирович, 1988 года рождения. В 2014 году с отличием окончил обучение в магистратуре Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (СГАУ, ныне Самарский университет) по направлению «Прикладные математика и физика». В списке научных работ Е.В. Бызова 15 публикаций и 1 авторское свидетельство. E-mail: xameak@bigmir.net.

Досколович Леонид Леонидович в 1989 году с отличием окончил Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне Самарский университет) по специальности «Прикладная математика». Доктор физико-математических наук (2001 год), профессор, работает заведующим Лабораторией дифракционной оптики ИС-ОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН и профессором кафедры технической кибернетики Самарского университета. Специалист в области дифракционной оптики, лазерных информационных технологий, нанофотоники. E-mail: leonid@smr.ru.

ГРНТИ: 29.31.29.

Поступила в редакцию 16 октября 2017 г. Окончательный вариант – 6 ноября 2017 г.

DESIGN OF EXTRUDED REFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS TO GENERATE A PRESCRIBED INTENSITY DISTRIBUTION

K.V. Andreeva ^{1,2}, E.S. Andreev ^{1,2}, M.A. Moiseev ^{1,2}, S.V. Kravchenko ^{1,2}, E.V. Byzov ^{1,2}, L.L. Doskolovich ^{1,2}
¹ Image Processing Systems Institute of the RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Samara, Russia,
² Samara National Research University, Samara, Russia

Abstract

A new method for the design of extruded optical elements with two refractive surfaces is presented. The method is based on the developed fast ray-tracing procedure, in which optical surfaces are approximated by a set of planes. High efficiency of the proposed method is illustrated by the examples of designed extruded optical elements for generating uniform intensity and illuminance distributions. The luminous efficacy of the optical element is shown to be over 89 %, whereas the relative root-mean-square error of the generated irradiance distribution is under 2 %.

Keywords: LED optical element, secondary optics, ray tracing, optimization of optical surfaces.

Citation: Andreeva KV, Andreev ES, Moiseev MA, Kravchenko SV, Byzov EV, Doskolovich LL. Design of extruded refractive optical elements to generate a prescribed intensity distribution. *Computer Optics* 2017; 41(6): 812-819. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-812-819.

Acknowledgement: The work was funded by the Russian Foundation for Basic Research (grant #17-47-630164).

References

- [1] Wu R, Xu L, Liu P, Zhang Y, Zheng Z, Li H, Liu X. Freeform illumination design: a nonlinear boundary problem for the Monge–Ampère equation. *Opt Lett* 2013; 38(2): 229-231. DOI: 10.1364/OL.38.000229.
- [2] Wu R, Benítez P, Zhang Y, Miñano JC. Influence of the characteristics of a light source and target on the Monge–Ampère equation method in freeform optics design. *Opt Lett* 2014; 39(3): 634-637. DOI: 10.1364/OL.39.000634.
- [3] Kravchenko SV, Moiseev MA, Doskolovich LL, Kazanskiy NL. Design of axis-symmetrical optical element with two aspherical surfaces for generation of prescribed irradiance distribution [In Russian]. *Computer Optics* 2011; 35(4): 467-472.
- [4] Olikier VI, Waltman P. Radially symmetric solutions of a MongeAmpere equation arising in the reflector mapping problem. *Proceedings of the UAB International Conference on Differential Equations and Mathematical Physics, Lecture Notes in Math* 1987: 361-374.
- [5] Moiseev MA, Doskolovich LL, Borisova KV, Byzov EV. Fast and robust technique for design of axisymmetric TIR optics in case of an extended light source. *J Mod Opt* 2013; 60(14): 1100-1106. DOI: 10.1080/09500340.2013.844864.
- [6] Luo Y, Feng Z, Han Y, Li H. Design of compact and smooth free-form optical system with uniform illuminance for LED source. *Optics Express* 2010; 18(9): 9055-9063. DOI: 10.1364/OE.18.009055.
- [7] Liu P, Wang H, Wu R, Yang Y, Zhang Y, Zheng Y, Li H, Liu X. Uniform illumination design by configuration of LEDs and optimization of LED lens for large-scale color-mixing applications. *Applied Optics* 2013; 52(17): 3998-4005. DOI: 10.1364/AO.52.003998.
- [8] Moiseev MA, Doskolovich LL, Kazanskiy NL. Design of high-efficient freeform LED lens for illumination of elongated rectangular regions. *Optics Express* 2011; 19(53): A225-A233. DOI: 10.1364/OE.19.00A225.
- [9] Chen E, Yu F. Design of LED-based reflector-array module for specific illuminance distribution. *Opt Commun* 2013; 289: 19-27. DOI: 10.1016/j.optcom.2012.09.082.
- [10] Tadmor Z, Klein I. *Engineering principles of plasticating extrusion*. New York: Van Nostrand Reinhold Inc.; 1970. ISBN: 978-0442156350.
- [11] Zhang JX, Lowery CH. Extruded wide angle lens for use with a LED light source. Patent US8602604 of December 10, 2013.
- [12] Parkyn WA, Pelka DG. Cylindrical irradiance-mapping lens and its applications to LED shelf-lighting. Patent US7273299 of September 25, 2007.
- [13] Parkyn WA, Pelka DG. Linear illumination lens with Fresnel facets. Patent US7559672 of June 14, 2009.
- [14] Doskolovich LL, Moiseev MA. Design of radiosymmetrical refractive surfaces with taking Fresnel loss into

- account [In Russian]. Computer Optics 2008; 32(2): 201-203.
- [15] Doskolovich LL, Kharitonov SI, Petrova OI. A DOE to form a line-shaped directivity diagram [In Russian]. Computer Optics 2002; 24: 40-42.
- [16] Butcher JCh. Numerical methods for ordinary differential equations. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons; 2003. ISBN: 978-0-471-96758-3.
- [17] Andreev ES, Moiseev MA, Borisova KV, Doskolovich LL. Monte-Carlo ray tracing method for axisymmetrical optical elements [In Russian]. Computer Optics 2015; 39(3): 357-362. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-3-357-362.
- [18] Keys RG. Cubic convolution interpolation for digital image processing. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing 1981; 29(6): 1153-1160. DOI: 10.1109/TASSP.1981.1163711.
- [19] Moiseev MA, Borisova KV, Byzov EV, Doskolovich LL. Optimization method for computation of tir optical elements based on quick raytracing procedure [In Russian]. Computer Optics 2013; 37(1): 51-58.

Authors' information

Kseniya Valeryevna Andreeva (b. 1992) graduated with honors (2016) from Samara National Research University, majoring in Applied Mathematics and Physics. She is a co-author of 13 scientific papers. E-mail: ksen.borisova@gmail.com.

Evgeniy Sergeevich Andreev (b. 1992) graduated with honors (2016) from Samara National Research University, majoring in Applied Mathematics and Physics. He is a second-year student on Master's program, majoring in Mathematical Modeling and Information Technologies in Photonics at Samara National Research University. E-mail: gsomix@gmail.com.

Mikhail Alexandrovich Moiseev (b. 1986) graduated with honors (2008) from S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU), majoring in Applied Mathematics and Physics. He received his Candidate's Degree in Physics and Mathematics (2011) from Samara State Aerospace University. He is a researcher at the Diffraction Optics laboratory of the IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. He is a SPIE-member. He is co-author of 23 scientific papers and seven inventions and patents. His current research interests include nonimaging optics. <http://www.ipsi.smr.ru/staff/MoiseevM.htm>.

Sergey Vasilyevich Kravchenko (b. 1991) graduated with honors (2014) from Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov (SSAU), majoring in Applied Mathematics and Physics. He is a co-author of 18 scientific papers. E-mail: sergey.kravchenko91@gmail.com.

Egor Vladimirovich Byzov (b. 1988) graduated with honors (2014) from Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov (presently, Samara University), majoring in Applied Mathematics and Physics. He is coauthor of 15 scientific papers and 1 patent.

Leonid Leonidovich Doskolovich graduated with honors (1989) from S.P. Korolyov Kuibyshev Aviation Institute (Samara University), majoring in Applied Mathematics. He received his Doctor in Physics & Maths (2001) degree from Samara State Aerospace University. Head of laboratory of the IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, professor at Samara University's Technical Cybernetics sub-department. Current research interests include diffractive optics, laser information technologies, and nanophotonics. E-mail: leonid@smr.ru.

Received October 16, 2017. The final version – November 6, 2017.