

РАСЧЁТ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С ДВУМЯ ПРЕЛОМЛЯЮЩИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ ИЗ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАДАННОЙ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ

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

¹ Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия,

² Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия

Аннотация

Представлен новый метод расчёта двух преломляющих поверхностей оптических элементов светодиодов из условия формирования заданного распределения интенсивности. Процедура расчёта позволяет разделить работу по преломлению лучей между внутренней и внешней поверхностями в заданном соотношении. В качестве примера рассчитан оптический элемент, формирующий с эффективностью 89 % диаграмму направленности для освещения улиц и дорог класса А. Полученный элемент с запасом удовлетворяет критериям, предъявляемым к освещению дорог данного типа, при размещении фонарных столбов на расстоянии от 20 до 35 м друг от друга.

Ключевые слова: расчёт оптических поверхностей, поверхность свободной формы, распределение интенсивности, светодиод, неизображающая оптика, геометрооптический расчёт.

Цитирование: Кравченко, С.В. Расчёт оптических элементов с двумя преломляющими поверхностями из условия формирования заданной диаграммы направленности / С.В. Кравченко, Е.В. Бызов, М.А. Моисеев, Л.Л. Досколович // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 4. – С. 508-514. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-508-514.

Введение

Использование светоизлучающих диодов (СИД) в конструкции современных светотехнических устройств делает актуальной задачу проектирования так называемой вторичной оптики – преломляющих или отражающих оптических элементов, перераспределяющих световой поток источника в заданную область пространства. Задача расчёта поверхностей оптического элемента из условия формирования заданного светового распределения относится к классу обратных задач неизображающей оптики и является крайне сложной. Даже в случае точечного источника света и единственной отражающей или преломляющей поверхности данная задача может быть сведена к решению дифференциального уравнения в частных производных второго порядка типа Монжа–Ампера [1, 2]. Аналитические решения этого уравнения известны только для случаев с осевой симметрией [3–6].

Для формирования сложных распределений, не обладающих радиальной или цилиндрической симметрией, используются оптические элементы с так называемыми поверхностями свободной формы (в англ. лит. *free-form surface*, досл. перевод – поверхности свободной формы). Наиболее популярными являются преломляющие оптические элементы с внешней поверхностью свободной формы и внутренней полусферической полостью, которая не выполняет работу по преломлению лучей [7–10]. Однако для улучшения рабочих характеристик оптического элемента в его конструкции могут использоваться две преломляющие поверхности, каждая из которых выполняет часть работы по повороту луча [11–16].

Метод, представленный в работе [11], позволяет рассчитать две преломляющие или отражающие поверхности, преобразующие два входящих волновых фронта в два требуемых. Применение данного метода к решению светотехнической задачи является затруд-

нительным, так как в статье не формализован процесс преобразования требований светового распределения к требованиям формирования волнового фронта. В работах [12, 13] авторы рассматривают общий подход к решению задачи расчёта двух преломляющих поверхностей, формирующих требуемое распределение освещённости. Решение задачи расчёта поверхностей оптического элемента состоит из двух этапов: нахождения функции лучевого соответствия, связывающей координаты луча от источника с координатами этого же луча в выходной плоскости и восстановления поверхностей, реализующих найденное лучевое соответствие. К сожалению, в статьях [12, 13] приведено слишком сжатое описание сути метода, из-за чего повторение представленных результатов не представляется возможным. Также авторы работ не указывают значения световых эффективностей полученных решений. Таким образом, задача расчёта оптических элементов светодиодов с двумя рабочими поверхностями свободной формы остаётся по-прежнему актуальной.

В работе представлен новый метод, позволяющий рассчитывать оптические элементы с двумя рабочими преломляющими поверхностями из условия формирования заданной диаграммы направленности. Метод позволяет распределять работу по повороту лучей между поверхностями в заданном соотношении. В качестве демонстрации его работоспособности рассчитан оптический элемент со световой эффективностью 89 %, предназначенный для освещения улиц и дорог класса А.

1. Расчёт оптического элемента для формирования заданной диаграммы направленности

Рассмотрим задачу расчёта преломляющего оптического элемента, формирующего заданное распределение интенсивности $I_{req}(x)$. Пусть в начале координат находится точечный источник излучения (свето-

диод) с диаграммой направленности $I_{src}(\mathbf{x})$. Оптический элемент с показателем преломления n располагается над светодиодом. Необходимо рассчитать его внутреннюю и внешнюю поверхности из условия создания требуемого распределения интенсивности $I_{req}(\mathbf{x})$. Расчёт поверхностей оптического элемента будем выполнять последовательно, для каждой поверхности получим сначала кусочно-гладкое решение из условия формирования дискретного светового распределения, аппроксимирующего непрерывную диаграмму направленности $I_{req}(\mathbf{x})$, а затем сгладим полученное решение NURBS-сплайном.

1.1. Расчёт внутренней поверхности оптического элемента

Аппроксимируем непрерывную диаграмму направленности $I_{req}(\mathbf{x})$ дискретным световым распределением (Φ_i, \mathbf{x}_i) , $i = 1, \dots, N$, представляющим собой набор сколлимированных световых пучков со световыми потоками Φ_i , распространяющихся в соответствующих направлениях \mathbf{x}_i . Для этого разобьём область определения функции $I_{req}(\mathbf{x})$ на малые телесные углы $\delta\Omega_i$, и для каждого элемента разбиения $\delta\Omega_i$ рассчитаем значения интегрированного светового потока Φ_i и взвешенное среднее направление \mathbf{x}_i :

$$\Phi_i = \int_{\delta\Omega_i} I(\mathbf{x}) d\Omega, \tag{1}$$

$$\mathbf{x}_i = \frac{\int_{\delta\Omega_i} \mathbf{x} I(\mathbf{x}) d\Omega}{\Phi_i}. \tag{2}$$

Будем искать решение для внутренней поверхности в виде кусочно-гладкой поверхности, состоящей из N сегментов, каждый из которых сужает угловой размер падающего на него пучка, преломляя его в соответствующем направлении \mathbf{x}_i . Здесь и далее под сужением будем понимать выполнение следующей функции лучевого соответствия:

$$\gamma = k\psi, \tag{3}$$

где ψ и γ – углы между лучом и направлением \mathbf{x}_i до и после его преломления сегментом внутренней поверхности соответственно. Коэффициент $k \in [0; 1]$ определяет соотношение, в котором разделяется работа по повороту лучей между внутренней и внешней поверхностями. Рассмотрим расчёт сегмента внутренней поверхности, реализующего функцию лучевого соответствия (3) (рис. 1).

Уравнение для расчёта профиля $r(\psi)$ преломляющей поверхности, реализующей заданную функцию лучевого соответствия, было получено в работе [4]:

$$\frac{dr(\psi)}{d\psi} = -r(\psi) \frac{\sin(\psi - \gamma(\psi))}{\frac{1}{n} - \cos(\psi - \gamma(\psi))}. \tag{4}$$

Подставим функцию $\gamma(\psi)$ вида (3) в уравнение (4) и проинтегрируем его для того, чтобы получить выражение для сегмента внутренней поверхности:

$$r(\psi) = r_0 \left(\frac{\cos((1-k)\psi) - \frac{1}{n}}{1 - \frac{1}{n}} \right)^{\frac{1}{k-1}}, \tag{5}$$

где $r_0 = r(0)$ – параметр, определяющий размер сегмента внутренней поверхности.

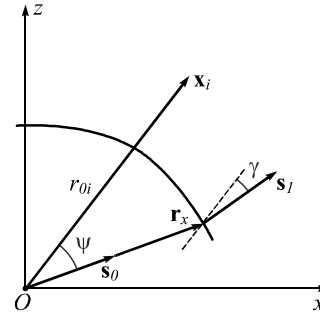


Рис. 1. Принцип работы сегмента внутренней поверхности

Выразим угол ψ в выражении (5) через единичный вектор луча \mathbf{s}_0 и направление коллимирования \mathbf{x}_i для перехода к общему виду сегмента внутренней поверхности:

$$\begin{cases} \mathbf{r}(\mathbf{s}_0) = r(\mathbf{s}_0) \mathbf{s}_0, \\ r(\mathbf{s}_0) = r_0 \left(\frac{\cos((1-k) \arccos(\mathbf{s}_0, \mathbf{x})) - \frac{1}{n}}{1 - \frac{1}{n}} \right)^{\frac{1}{k-1}}. \end{cases} \tag{6}$$

Определим кусочно-гладкую внутреннюю поверхность, состоящую из N сегментов вида (6), следующим образом [9]:

$$\begin{cases} \mathbf{r}_x(\mathbf{s}_0) = r_i(\mathbf{s}_0) \mathbf{s}_0, \\ i = \arg \min_j r_j(\mathbf{s}_0), \\ r_j(\mathbf{s}_0) = r_{0j} \left(\frac{\cos((1-k) \arccos(\mathbf{s}_0, \mathbf{x}_j)) - \frac{1}{n}}{1 - \frac{1}{n}} \right)^{\frac{1}{k-1}} \end{cases} \tag{7}$$

Форма кусочно-гладкой поверхности (7) полностью определяется набором параметров сегментов $r_{0i}, i = 1, \dots, N$. Каждый параметр r_{0i} характеризует размер i -го сегмента и падающий на него световой поток Φ_i , отклоняемый поверхностью в направлении \mathbf{x}_i . Для расчёта параметров r_{0i} предлагается использовать метод, предложенный В. Оликером в работах [8, 9]. В этом случае построение внутренней кусочно-гладкой поверхности, формирующей заданное дискретное световое распределение, сводится к следующей последовательности действий:

1. Инициализация вектора параметров начальных значений r_{0i} .

- Расчёт формируемого дискретного светового распределения $\Phi_{i,calc}$ в предположении, что все лучи, попавшие на произвольный i -й сегмент внутренней поверхности и частично отклонённые им в направлении \mathbf{x}_i , будут в дальнейшем сфокусированы внешней поверхностью в данном направлении. Для расчёта значений $\Phi_{i,calc}$ выполняется трассировка лучей с помощью выражений (7): для каждого луча \mathbf{s}_0 с помощью последнего выражения (7) вычисляется N значений $r_j(\mathbf{s}_0)$, затем находится индекс i ближайшего сегмента с минимальным значением модуля радиус-вектора r_i , и к световому потоку i -й точки диаграммы направленности прибавляется энергия данного луча \mathbf{s}_0 .
- Вычисление максимальной ошибки $\max(|\Phi_{i,calc} - \Phi_i|)$ формирования заданной дискретной диаграммы направленности. В случае, когда текущая ошибка превосходит заданную точность формирования дискретного распределения, выполняется переход к шагу 4, иначе расчёт кусочно-гладкой внутренней поверхности считается завершённым.
- Коррекция значений $r_{0i} = r_{0i} \pm \Delta_{i,r}$ и переход к шагу 2. Отметим, что в работах [8, 9] предложен простой способ корректировки параметров сегментов, который гарантирует глобальную сходимость итерационного процесса и может быть использован для решения данной задачи.

Представленная последовательность действий позволяет получить кусочно-гладкую поверхность из условия формирования дискретного светового распределения вида (1), (2). Для получения непрерывной внутренней поверхности необходимо выполнить аппроксимацию полученного кусочно-гладкого решения NURBS-сплайном.

1.2. Расчёт внешней поверхности оптического элемента

Расчёт внешней поверхности выполняется аналогично расчёту внутренней поверхности: сначала определяется кусочно-гладкое решение, формирующее дискретную диаграмму направленности, а затем оно аппроксимируется NURBS-сплайном. Как и в случае с внутренней поверхностью, кусочно-гладкая внешняя поверхность состоит из N сегментов, каждый из которых коллимирует падающий световой поток в некотором направлении \mathbf{x}_i .

Форма i -го сегмента $\mathbf{M}_i(\mathbf{s}_0)$ задаётся согласно принципу Ферма следующим образом:

$$\begin{cases} \mathbf{M}_i(\mathbf{s}_0) = \mathbf{r}(\mathbf{s}_0) + l_i(\mathbf{s}_0)\mathbf{s}_1, \\ l_i(\mathbf{s}_0) = \frac{l_{0i}(1-n) + r(\mathbf{s}_0)(1 - (\mathbf{s}_0, \mathbf{x}_i))}{(\mathbf{s}_1(\mathbf{s}_0), \mathbf{x}_i) - n}, \end{cases} \quad (8)$$

где $\mathbf{r}(\mathbf{s}_0)$ – рассчитанная ранее гладкая внутренняя поверхность, $l_i(\mathbf{s}_0)$ – скалярная функция, определяющая расстояние от точки $\mathbf{r}(\mathbf{s}_0)$ внутренней поверхности до

точки $\mathbf{M}_i(\mathbf{s}_0)$ сегмента внешней поверхности вдоль преломлённого луча $\mathbf{s}_1(\mathbf{s}_0)$ внутри оптического элемента, l_{0i} – параметр i -го сегмента. Кусочно-гладкая внешняя поверхность определяется аналогично внутренней поверхности следующим образом:

$$\begin{cases} \mathbf{R}(\mathbf{s}_0) = \mathbf{r}(\mathbf{s}_0) + l_i(\mathbf{s}_0)\mathbf{s}_1, \\ i = \arg \min l_j(\mathbf{s}_0), \\ l_j(\mathbf{s}_0) = \frac{l_{0j}(1-n) + r(\mathbf{s}_0)(1 - (\mathbf{s}_0, \mathbf{x}_j))}{(\mathbf{s}_1(\mathbf{s}_0), \mathbf{x}_j) - n}. \end{cases} \quad (9)$$

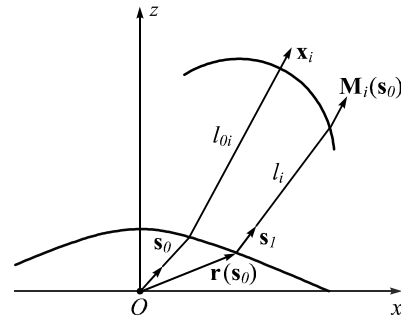


Рис. 2. Принцип работы сегмента внешней поверхности

Так же, как и для внутренней поверхности, вид кусочно-гладкого решения для внешней поверхности полностью определяется набором N параметров l_{0i} . Для их расчёта может быть использован алгоритм, аналогичный изложенному в пункте 1.1.

Способ подбора параметров r_{0i} и l_{0i} , предложенный в работах [8, 9], обеспечивает монотонное уменьшение ошибки итерационного процесса, но обладает относительно высокой вычислительной сложностью. Так как дискретизация непрерывной диаграммы направленности $I_{req}(\mathbf{x})$ в общем случае при расчёте внутренней и внешней поверхностей может отличаться, мы предлагаем при «разбиении» диаграммы направленности для внутренней поверхности использовать меньшее количество точек по сравнению с дискретизацией для внешней поверхности. Такой подход позволяет сократить время расчёта внутренней поверхности оптического элемента без ущерба качеству формируемого распределения, так как точность формирования требуемой диаграммы направленности, в конечном счёте, определяется формой внешней поверхности. На практике хорошие результаты показывает использование 200–500 точек в диаграмме направленности для внутренней поверхности и 1000–2000 точек – для внешней поверхности.

2. Пример расчёта оптического элемента

Предложенный выше метод расчёта оптических элементов с двумя преломляющими поверхностями был реализован в среде программирования Matlab®. Для проверки его работоспособности был рассчитан оптический элемент, формирующий диаграмму направленности для освещения магистральных дорог и улиц общегородского значения.

Задача формирования диаграммы направленности для дорожного освещения является крайне сложной, так как в этом случае необходимо учитывать свойства дорожного покрытия, расстояние между фонарными столбами, количество и ширину полос для движения и т.д. Требования, предъявляемые в России к освещению улиц и дорог, регламентируются сводом правил СП 52.13330.2011. Согласно нормативным документам, основными критериями, предъявляемыми для оценки качества формируемого распределения, являются величины, связанные как с распределением освещённости на дороге (средняя освещённость L_{av} , равномерность распределения освещённости U_n), так и характеристики, определяемые создаваемым распределением яркости (средняя яркость L_{av} , общая равномерность распределения яркости U_0 , продольная равномерность распределения яркости U_L , пороговое приращение яркости TI). В качестве требуемого распределения для расчёта оптического элемента была вручную подобрана диаграмма направленности, сечения которой представлены на рис. 3. Данное распределение интенсивности подходит для освещения дорог класса А (магистральные дороги и улицы общегородского значения). Подтверждением этого является тот факт, что она очень близка к распределению интенсивности распространённых коммерческих решений (Khatod, LEDIL, Ledlink и т.п.).

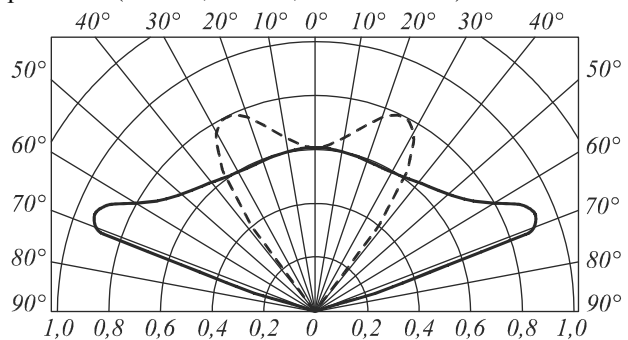


Рис. 3. Профили требуемой диаграммы направленности для освещения дорог класса А

Распределение интенсивности с сечениями на рис. 3 было аппроксимировано дискретным распределением, включающим 900 точек вида (1), (2), после чего был рассчитан оптический элемент с показателем преломления $n = 1,493$ (полиметилметакрилат, ПММА). При расчёте использовался коэффициент $k = 0,5$, что соответствует наиболее эффективному разделению работы по преломлению лучей между поверхностями в соотношении 50/50 (доказательство представлено в приложении). Световая эффективность рассчитанного элемента составила 89%. Такое значение световой эффективности является близким к теоретическому максимуму в 92%, так как минимум по 4% светового потока теряется на каждой границе раздела сред вследствие френелевских потерь (даже в случае нормального падения лучей). Трёхмерная модель данного элемента и сечения промоделированной в коммерческом программном обеспечении TracePro

диаграммы направленности представлены на рис. 4 и 5 соответственно.

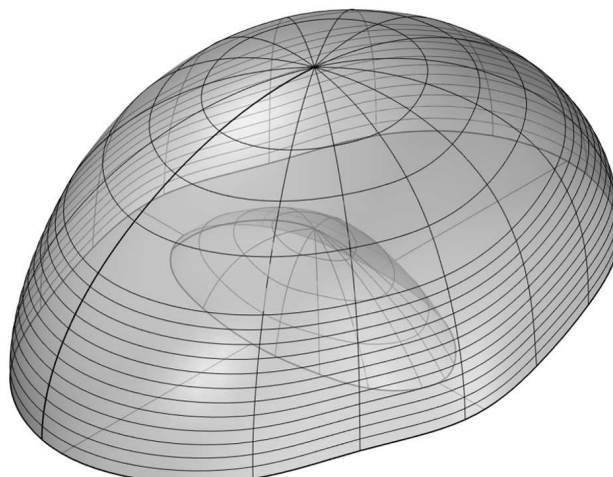


Рис. 4. Оптический элемент для освещения дорог класса А

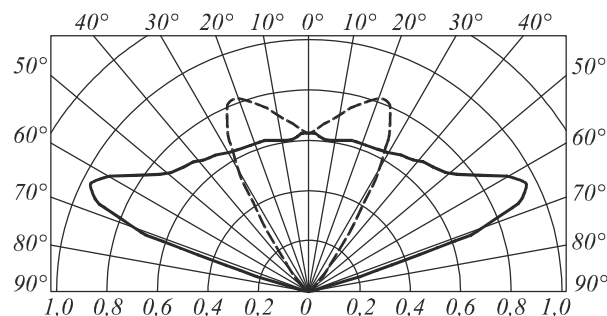


Рис. 5. Профили диаграммы направленности, формируемой рассчитанным оптическим элементом

Для анализа качества диаграммы направленности, формируемой рассчитанным оптическим элементом, было выполнено моделирование светового распределения на дорожном покрытии в программном обеспечении DIALux [17]. При моделировании использовалась следующая конфигурация расположения светильников: высота подвеса светильника – 9 м, вылет консоли над краем проезжей части – 0,5 м, угол наклона консоли – 20° (рис. 6), общее число полос движения по дороге в обоих направлениях – 2, ширина каждой полосы – 3,5 м, полный световой поток с одного светильника – 15 000 лм.

В табл. 1 представлены значения средней яркости L_{av} , общей равномерности распределения яркости U_0 , продольной равномерности распределения яркости U_L , средней освещённости E_{av} и порогового приращения яркости TI для расстояний между фонарями, равных 20, 25, 30 и 35 м, а также требуемые значения этих характеристик для дорог класса А.

Результаты, представленные в табл. 1, демонстрируют, что световое распределение оптического элемента, рассчитанного предложенным методом, удовлетворяет требованиям, предъявляемым к освещению дорог класса А. Световое распределение является достаточно универсальным и обеспечивает высокие рабочие характеристики при различных конфигурациях расположения дорожных фонарей.

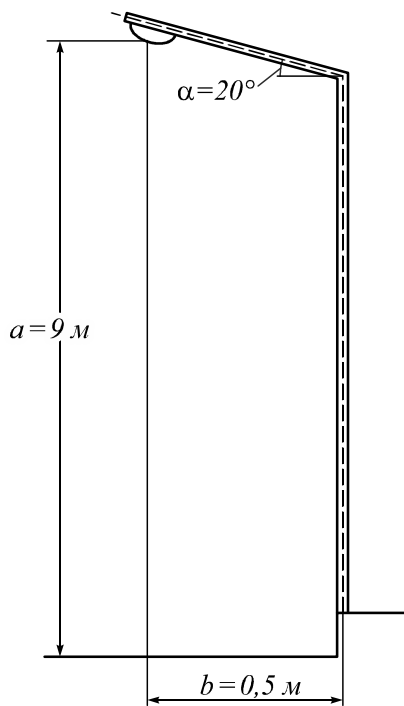


Рис. 6. Схема дорожного светильника

Заключение

Представлен метод расчёта двух преломляющих поверхностей оптического элемента, формирующего заданную диаграмму направленности. Расчёт внутренней и внешней поверхностей происходит последовательно и состоит из двух шагов: получения кусочно-гладкого решения из условия формирования дискретного светового распределения, являющегося приближением требуемой непрерывной диаграммы направленности, и дальнейшей аппроксимации поверхности NURBS-сплайном. Для расчёта кусочно-гладкого приближения используется метод, предложенный В. Оликером в работе [8], обеспечивающий сходимость итерационного процесса к глобальному минимуму.

С помощью разработанного метода рассчитан оптический элемент, формирующий диаграмму направленности для освещения дорог класса А. Полученный элемент с высокой эффективностью в 89 % создаёт распределение интенсивности, которое с большим запасом удовлетворяет всем критериям, предъявляемым к освещению дорог данного типа. Показано, что вторичная оптика, рассчитанная данным методом, может применяться при размещении фонарных столбов на различных расстояниях друг от друга: от 20 до 35 м.

Табл.1. Значения основных характеристик качества освещения дорожного покрытия и требования, предъявляемые к ним

	Расстояние между фонарями, м	Средняя яркость L_{av} , кд/м ²	Общая равномерность распределения яркости U_0	Продольная равномерность распределения яркости U_L	Средняя освещённость E_{av} , лк	Пороговое приращение яркости TI , %
Значения, полученные при моделировании рассчитанного оптического элемента	20	2,54	0,78	0,81	38	5
	25	2,04	0,76	0,80	30	6
	30	1,70	0,75	0,81	25	7
	35	1,46	0,70	0,73	22	8
Требуемые значения		$\geq 0,8$	$\geq 0,4$	$\geq 0,5$	≥ 15	≤ 15

Приложение

Рассмотрим задачу поворота луча s_0 в направлении s_1 с помощью двух преломляющих поверхностей. Косинус полного угла поворота луча определим соотношением $\cos \delta = (s_0, s_1)$. Поворот луча на угол δ может быть осуществлён бесконечным числом способов: если первая поверхность выполняет поворот луча s_0 на любой произвольный угол α в направлении s_1 , то вторая поверхность должна повернуть его на угол $\delta - \alpha$ в том же направлении. Определим угол α , при котором френелевские потери на отражение окажутся минимальными, а общий коэффициент пропускания Френеля $T_{full}(\alpha) = T(\alpha)T(\delta - \alpha)$ – максимальным; здесь $T(\alpha)$ и $T(\delta - \alpha)$ – коэффициенты пропускания Френеля для первой и второй поверхностей соответственно.

Продифференцируем функцию $T_{full}(\alpha)$ и приравняем её производную к нулю для определения экстремума:

$$T'_{full}(\alpha) = T'(\alpha)T(\delta - \alpha) - T(\alpha)T'(\delta - \alpha) = 0. \quad (10)$$

Корнем уравнения (10) является $\alpha = \delta / 2$. Выясним тип экстремума функции $T_{full}(\alpha)$ в точке $\alpha = \delta / 2$.

Для этого вычислим знак её второй производной в той же точке:

$$T''_{full}(\alpha) \Big|_{\delta/2} = 2T''(\delta/2)T(\delta/2) - 2T'^2(\delta/2). \quad (11)$$

Первое слагаемое $2T''(\delta/2)T(\delta/2)$ в выражении (11) является отрицательным, так как значение функции $T(\delta/2)$ положительно, множитель $T''(\delta/2)$ также отрицателен, так как функция $T(\alpha)$ является выгнутой вверх (рис. 7). Так как второе слагаемое $-2T'^2(\delta/2)$ также является отрицательным, значение второй производной в точке $\alpha = \delta / 2$ $T''_{full}(\alpha) \Big|_{\alpha=\delta/2}$ меньше нуля, а сама точка $\alpha = \delta / 2$ является максимумом функции $T_{full}(\alpha)$.

Таким образом, наиболее эффективным способом поворота луча двумя преломляющими поверхностями на некоторый угол δ выполняется в случае, когда каждая поверхность отклоняет луч на угол $\delta/2$.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 14-19-00969.

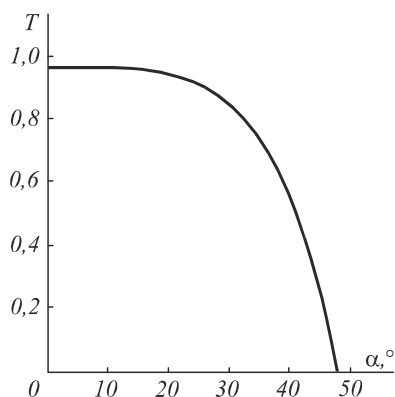


Рис. 7. Зависимость коэффициента пропускания Френеля от угла поворота для полиметилметакрилата, $n=1,493$

Литература

1. **Ma, Y.** Hybrid method of free-form lens design for arbitrary illumination target / Y. Ma, H. Zhang, Z. Su, Y. He, L. Xu, H. Li // *Applied Optics*. – 2015. – Vol. 54(14). – P. 4503-4508.
2. **Guan, P.** On a Monge-Ampere equation arising in geometric optics / P. Guan, X.-J. Wang // *Journal of Differential Geometry*. – 1998. – Vol. 48(2). – P. 205-223. – ISSN 0022-040X.
3. **Oliker, V.I.** Radially symmetric solutions of a Monge-Ampere equation arising in the reflector mapping problem / I. Knowles [at all] // *Proceedings of the UAB International Conference on Differential Equations and Mathematical Physics, Lecture Notes in Math*. – 1987. – P. 361-374.
4. **Moiseev, M.A.** Fast and robust technique for design of axis-symmetric 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.
5. **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.
6. **Elmer, W.B.** Optical design of reflectors. / W.B. Elmer // *Applied Optics*. – 1978. – Vol. 17(7). – P. 977-979. – ISSN 0003-6935.
7. **Wu, R.** Influence of the characteristics of a light source and target on the Monge-Ampere equation method in freeform optics design / R. Wu, P. Benitez, Y. Zhang, J.C. Minano // *Optics Letters*. – 2014. – Vol. 39(3). – P. 634-637.
8. **Oliker, V.** Supporting quadric method in optical design of freeform lenses for illumination control of a collimated light / V. Oliker, J. Rubinstein, G. Wolansky // *Advances in Applied Mathematics*. – 2015. – Vol. 62. – P. 160-183.
9. **Oliker, V.I.** Mathematical aspects of design of beam shaping surfaces in geometrical optics / V.I. Oliker // *Trends in Nonlinear Analysis*: ed. by V.I. Oliker, M. Kirkilionis, S. Krömker, R. Rannacher, F. Tomi. – Springer, 2003. – P. 197-224.
10. **Lin, K.** Weighted least-square design of freeform lens for multiple point sources / K. Lin // *Optical Engineering*. – 2013. – Vol. 21(3). – P. 3201-3212.
11. **Benitez, P.** Simultaneous multiple surface optical design method in three dimensions / P. Benitez, J.C. Minano, J. Blen, R. Mohedano, J. Chaves, O. Dross, M. Hernandez, W. Falicoff // *Optical Engineering*. – 2004. – Vol. 43(7) – P. 1489-1502.
12. **Bauerle, A.** Algorithm for irradiance tailoring using multiple freeform optical surfaces / A. Bauerle, A. Bruneton, R. Wester, J. Stollenwerk, P. Loosen // *Optics Express*. – 2012. – Vol. 20(13). – P. 14477-14485.
13. **Bruneton, A.** High resolution irradiance tailoring using multiple freeform surfaces / A. Bruneton, A. Bäuerle, R. Wester, J. Stollenwerk, P. Loosen // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21(9). – P. 10563-10571.
14. **Wu, R.** Influence of the characteristics of a light source and target on the Monge-Ampere equation method in freeform optics design / R. Wu, P. Benitez, Y. Zhang, J.C. Minano // *Optics Letters*. – 2014. – Vol. 39(3). – P. 634-637.
15. **Hu, R.** Design of a novel freeform lens for LED uniform illumination and conformal phosphor coating / R. Hu, X. Luo, H. Zheng, Z. Qin, Z. Gan, B. Wu, S. Liu // *Optics Express*. – 2012. – Vol. 20(13). – P. 13727-13737.
16. **Hu, R.** Design of double freeform-surface lens for LED uniform illumination with minimum Fresnel losses / R. Hu, Z. Gan, X. Luo, H. Zheng, S. Liu // *Optik*. – 2013. – Vol. 124(19). – P. 3895-3897.
17. Программное обеспечение для расчёта освещения DIALux [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.dial.de/>.

References

- [1] Ma Y, Zhang H, Su Z, He Y, Xu L, Li H. Hybrid method of free-form lens design for arbitrary illumination target. *App Opt* 2015; 54(14): 4503-4508.
- [2] Guan P, Wang X-J. On a Monge-Ampere equation arising in geometric optics. *J Diff Geom* 1998; 48(2): 205-223.
- [3] Oliker VI, Waltman P. Radially symmetric solutions of a Monge-Ampere 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.
- [4] 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.
- [5] Kravchenko SV, Moiseev MA, Doskolovich LL, Kazanskiy NL. Design of axis-symmetrical optical element with two aspherical surfaces [In Russian]. *Computer Optics* 2011; 35(4): 467-472.
- [6] Elmer WB. Optical design of reflectors. *App Opt* 1978; 17(7): 977-979.
- [7] Wu R, Benitez P, Zhang Y, Minano J. Influence of the characteristics of a light source and target on the Monge-Ampere equation method in freeform optics design. *Opt Lett* 2014; 39(3): 634-637.
- [8] Oliker V, Rubinstein J, Wolansky G. Supporting quadric method in optical design of freeform lenses for illumination control of a collimated light. *Adv Appl Math* 2015; 62: 160-183.
- [9] Oliker VI. Mathematical aspects of design of beam shaping surfaces in geometrical optics. *Trends in Nonlinear Analysis*. Ed by M. Kirkilionis, S. Krömker, R. Rannacher, and F. Tomi. Springer, 2003.
- [10] Lin K. Weighted least-square design of freeform lens for multiple point sources. *Opt Eng* 2013; 21(3): 3201-3212.
- [11] Benitez P, Minano JC, Blen J, Mohedano R, Chaves J, Dross O, Hernandez M, Falicoff W. Simultaneous multiple surface optical design method in three dimensions. *Opt Eng* 2004; 43(7): 1489-1502.
- [12] Bauerle A, Bruneton A, Wester R, Stollenwerk J, Loosen P. Algorithm for irradiance tailoring using multiple freeform optical surfaces. *Opt Express* 2012; 20(13): 14477-14485.
- [13] Bruneton A, Bäuerle A, Wester R, Stollenwerk J, Loosen P. High resolution irradiance tailoring using multiple freeform surfaces. *Opt Express* 2013; 21(9): 10563-10571.
- [14] Wu R, Benitez P, Zhang Y, Minano JC. Influence of the characteristics of a light source and target on the Monge-

- Ampère equation method in freeform optics design. Opt Let 2014; 39(3): 634-637.
- [15] Hu R, Luo X, Zheng H, Qin Z, Gan Z, Wu B, Liu S. Design of a novel freeform lens for LED uniform illumination and conformal phosphor coating. Opt Express 2012; 20(13): 13727-13737.
- [16] Hu R, Gan Z, Luo X, Zheng H, Liu S. Design of double freeform-surface lens for LED uniform illumination with minimum Fresnel losses. Optik 2013; 124(19): 3895-3897.
- [17] Illumination design software DIALux. Source: <http://www.dial.de>.

DESIGN OF OPTICAL ELEMENTS WITH TWO REFRACTIVE SURFACES TO GENERATE A PRESCRIBED INTENSITY DISTRIBUTION

S.V. Kravchenko^{1,2}, E.V. Byzov^{1,2}, M.A. Moiseev^{1,2}, L.L. Doskolovich^{1,2}

¹Image Processing Systems Institute, Russian Academy of Sciences,

²Samara State Aerospace University

Abstract

A novel technique for designing optical elements with two refractive surfaces intended to generate a required intensity distribution has been presented. The design procedure makes it possible to control the balance of deflection angles between the inner and outer surfaces. As an example, an optical element producing the intensity distribution for illumination of class A road has been designed. The optical efficiency of the computed element is 89 % and such a secondary optics meets the requirements of class A road regulations when lamp poles are separated by a distance of 20-35 m.

Keywords: design of optical surfaces, free-form surface, intensity distribution, light emitting diode, non-imaging optics, geometric optical design.

Citation: Kravchenko SV, Byzov EV, Moiseev MA, Doskolovich LL. Design of optical elements with two refractive surfaces to generate a prescribed intensity distribution. Computer Optics 2015; 39(4): 508-14. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-508-514.

Acknowledgements: The work was funded by the Russian Science Foundation under project # 14-19-00969.

Сведения об авторах

Кравченко Сергей Васильевич, 1991 года рождения. В 2014 году с отличием окончил магистратуру Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва по направлению «Прикладные математика и физика». В списке научных трудов С.В. Кравченко 14 публикаций.

E-mail: sergey.kravchenko91@gmail.com.

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 co-author of 14 scientific papers.

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) по направлению «Прикладные математика и физика». В списке научных работ Е.В. Бызова 15 публикаций и 1 авторское свидетельство.

E-mail: xameak@bigmir.net.

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

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. М.А. Моисеев – специалист в области решения обратных задач геометрической оптики. В списке научных работ М.А. Моисеева 23 статьи и 7 авторских свидетельств.

Homepage: <http://www.ipsi.smr.ru/staff/MoiseevM.htm>. E-mail: mikhail@smr.ru.

Mikhail Alexandrovich Moiseev (b. 1986) graduated with honors (2008) from 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 the Image Processing Systems Institute of the RAS (IPSI RAS). He is a SPIE-member. He is co-author of 23 scientific papers and 7 inventions and patents. His current research interests include nonimaging optics.

Сведения об авторе Досколович Леонид Леонидович – см. стр. 468 этого номера.

Поступила в редакцию 11 августа 2015 г.
Окончательный вариант – 14 июля 2015 г.