

## ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ МЕТОД ДЛЯ РАСЧЁТА TIR ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ, ВКЛЮЧАЮЩИЙ ПРОЦЕДУРУ БЫСТРОЙ ТРАССИРОВКИ ЛУЧЕЙ

Моисеев М.А.<sup>1,2</sup>, Борисова К.В.<sup>2</sup>, Бызов Е.В.<sup>1,2</sup>, Досколович Л.Л.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт систем обработки изображений РАН,

<sup>2</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

### Аннотация

В данной работе представлен новый оптимизационный метод для расчёта осесимметричных оптических элементов светодиодов, формирующих заданные узкоугольные распределения освещённости. Метод основан на использовании разработанной процедуры быстрой трассировки лучей, в которой используется аппроксимация оптических поверхностей набором усечённых конусов. В качестве примера рассчитан оптический элемент, формирующий равномерно освещённую круглую область с угловым размером  $60^\circ$  для ламбертовского протяжённого источника излучения  $1 \times 1$  мм. Световая эффективность рассчитанного оптического элемента составляет около 91,5 %, среднеквадратичное отклонение сформированного распределения освещённости от заданного – менее 5 %.

**Ключевые слова:** оптический элемент светодиода, вторичная оптика, полное внутреннее отражение, трассировка, оптимизация оптической поверхности, узкоугольное световое распределение.

### Введение

При создании современных светодиодных проекторных систем используются оптические элементы (так называемая «вторичная оптика» светодиода), формирующие заданные распределения освещённости с малым угловым размером. Такие оптические элементы содержат как минимум три поверхности: внутреннюю поверхность, через которую осуществляется ввод излучения в оптический элемент; боковую поверхность, работающую по принципу полного внутреннего отражения и поворачивающую боковые лучи от источника; и верхнюю поверхность, через которую световой поток выходит из оптического элемента (рис. 1).

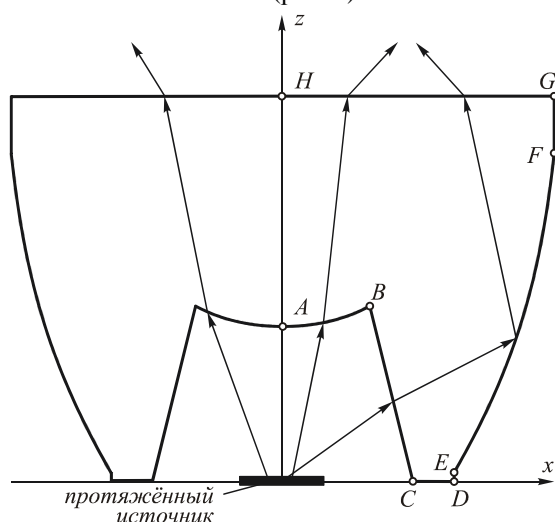


Рис. 1. Оптический элемент с боковой поверхностью, работающей по принципу полного внутреннего отражения

Расчёт поверхностей таких оптических элементов является весьма сложной задачей. В случае точечного источника излучения её решение приводит к интегрированию системы дифференциальных

уравнений первого порядка. В случае протяжённого источника излучения для расчёта оптических поверхностей используются различные оптимизационные методы, позволяющие подобрать их параметры и обеспечить наиболее точное формирование заданного распределения освещённости. Данный подход широко применяется в коммерческих программных продуктах TracePro [1], LightTools [2] и т. д. Использование вышеприведённых программных продуктов требует серьёзной квалификации, больших временных затрат (порядка нескольких дней на процедуру расчёта одного элемента) и далеко не всегда приводит к желаемому результату.

В опубликованных на настоящий момент и известных авторам работах по расчёту оптических элементов, работающих по принципу полного внутреннего отражения [3-6], не предложено какого-либо общего подхода к расчёту их поверхностей, учитывающего протяжённый характер источника излучения. В работе [3] рассмотрено только решение задачи коллимирования лучей от источника. В работе [4] для формирования узкоугольных равномерных распределений освещённости в прямоугольных и гексагональных областях предлагается использовать оптические элементы с внутренней коллимирующей поверхностью и внешней поверхностью, представляющей собой массив микролинз. К сожалению, данное решение не является универсальным и не позволяет формировать равномерно освещённые круглые области. В работах [5, 6] используется приближение точечного источника. Таким образом, при проектировании компактных оптических элементов представленные в них решения могут быть использованы только в качестве начального приближения для дальнейшей оптимизации.

В данной работе представлен универсальный оптимизационный метод для расчёта оптических элементов, работающих по принципу полного внутрен-

него отражения, учитывающий протяжённый характер источника излучения. Начальное приближение, используемое при оптимизации, получается путём численного решения задачи формирования заданного распределения освещённости для случая точечного источника, что обеспечивает хорошую сходимость оптимизационного метода. При расчёте функции ошибки применяется специальная процедура быстрой трассировки лучей, сокращающая время оптимизации до нескольких десятков минут. В качестве примера в работе приведены результаты моделирования рассчитанного оптического элемента, формирующего равномерное распределение освещённости в круглой области с угловым размером 60° от протяжённого ламбертовского источника излучения 1×1 мм. Световая эффективность полученного оптического элемента составляет 91,5 %, а среднеквадратичное отклонение формируемого распределения освещённости от заданного – менее 5 %.

**1. Расчёт профиля оптического элемента при точечном источнике излучения**

Рассмотрим задачу расчёта оптического элемента, работающего по принципу полного внутреннего отражения и формирующего заданное распределение освещённости  $E_0(\rho)$  в круглой области в выходной плоскости  $z = f$  от точечного источника излучения с интенсивностью  $I(\varphi)$ , расположенного в начале координат. Решение данной задачи может быть сведено к интегрированию системы дифференциальных уравнений первого порядка, разрешенных относительно производных.

Профиль оптического элемента изображён на рис. 2. Часть  $AB$  профиля преломляет световой пучок от источника излучения и формирует полное заданное распределение освещённости.

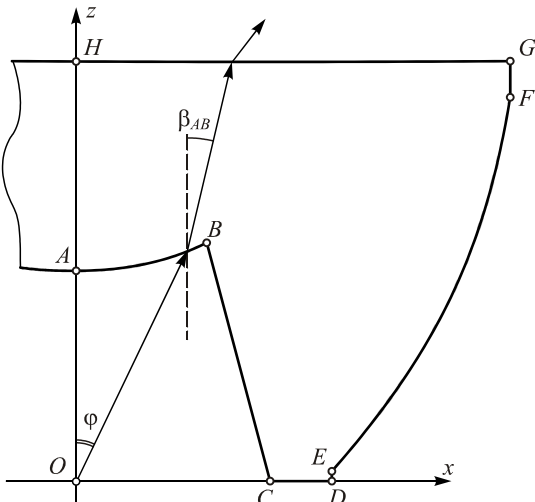


Рис. 2. Преломление лучей на поверхности  $AB$  оптического элемента

Часть  $BC$  является конической поверхностью с заданным углом наклона  $\alpha$ . Она перенаправляет лучи на боковую поверхность  $EF$ , работающую по

принципу полного внутреннего отражения и формирующую, так же как и часть  $AB$ , полное заданное световое распределение. Верхняя поверхность  $GH$  является плоской и используется для вывода излучения из оптического элемента. Части  $FG, CD, DE$  являются «инженерными» и могут использоваться для крепления оптического элемента. Части  $BC, CD, DE, FG, GH$  профиля задаются отрезками и однозначно определяются параметрами задачи. Рассмотрим расчёт частей  $AB$  и  $EF$  профиля.

Для нахождения части  $AB$  профиля запишем дифференциальное уравнение для модуля её радиус-вектора [7]:

$$\frac{dr_{AB}(\varphi)}{d\varphi} = r \frac{\sin(\beta_{AB}(\varphi) - \varphi)}{\frac{1}{n} - \cos(\beta_{AB}(\varphi) - \varphi)}, \tag{1}$$

где  $\beta_{AB}(\varphi)$  и  $\varphi \in [0; \varphi_{\max}]$  – угловые координаты преломлённого и падающего на поверхность  $AB$  лучей соответственно, а  $n$  — показатель преломления оптического элемента. Угловая координата  $\beta_{AB}(\varphi)$  может быть выражена через координату  $\rho(\varphi)$  точки пересечения луча и выходной плоскости следующим образом:

$$\beta_{AB}(\rho) = \arcsin\left(\frac{1}{n} \sin\left(\arctan\frac{\rho(\varphi)}{f}\right)\right). \tag{2}$$

Зависимость  $\rho(\varphi)$  определяется из закона сохранения светового потока. Световой поток, излучённый в элементарный телесный угол  $d\Omega = 2\pi \sin\varphi d\varphi$ , должен быть равен световому потоку, попадающему на соответствующую элементарную площадку в выходной плоскости  $dS = 2\pi\rho(\varphi)d\rho(\varphi)$ :

$$I(\varphi) 2\pi \sin\varphi d\varphi = E_0(\rho(\varphi)) 2\pi\rho(\varphi) d\rho(\varphi). \tag{3}$$

После замены  $2\rho(\varphi)d\rho(\varphi) = d\rho^2(\varphi)$  в уравнении (3) получим следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{d\rho^2(\varphi)}{d\varphi} = \frac{2I(\varphi)\sin\varphi}{E_0(\rho(\varphi))}. \tag{4}$$

Уравнение (4) является разрешённым относительно производной и может быть численно проинтегрировано, например, с помощью метода Рунге–Кутты [8].

Для расчёта части профиля  $EF$ , работающей по принципу полного внутреннего отражения, запишем уравнение наклонов [9]:

$$\frac{d\Psi_{EF}}{d\psi} = s_{1x} \frac{dx_{EF}}{d\psi} + s_{1z} \frac{dz_{EF}}{d\psi}, \tag{5}$$

где  $\Psi_{EF}(\psi)$  – это функция эйконала в точке  $S = (x_{EF}, 0, z_{EF})$  на поверхности  $EF$ ,  $\psi = \pi/2 - \varphi$  –

угол между соответствующим лучом, исходящим от источника, и осью  $Ox$ , а  $s_1 = (\sin \beta_{EF}, 0, \cos \beta_{EF})$  – единичный вектор отражённого луча (рис. 3).

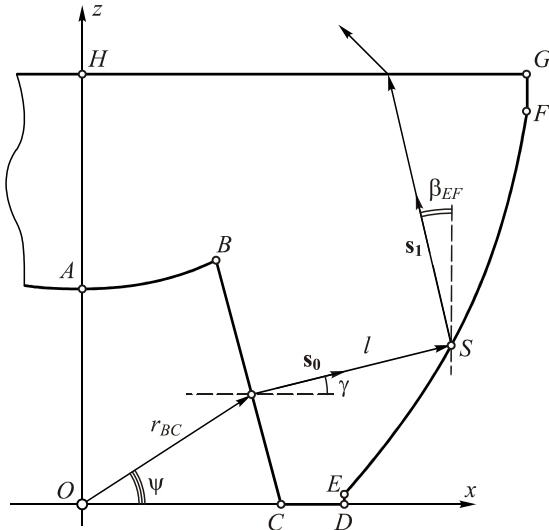


Рис. 3. – Отражение лучей на поверхности EF оптического элемента

Учитывая, что функция эйконала численно равна оптической длине пути луча  $\Psi_{EF} = r_{BC}(\psi) + nl(\psi)$  [10], запишем её производную как

$$\frac{d\Psi}{d\psi} = \frac{d(r_{BC}(\psi) + nl(\psi))}{d\psi} = \frac{dr_{BC}}{d\psi} + n \frac{dl}{d\psi}. \quad (6)$$

Координаты  $x_{EF}, z_{EF}$  в правой части уравнения (5) могут быть выражены из векторного соотношения  $\mathbf{r}_{EF} = \mathbf{r}_{BC} + l\mathbf{s}_0$  или

$$\begin{aligned} x_{EF} &= r_{BC} \cos \psi + l \cos \gamma, \\ z_{EF} &= r_{BC} \sin \psi + l \sin \gamma, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\gamma = \alpha + \arcsin \frac{\sin(\psi - \alpha)}{n}$  – угол между преломлённым на поверхности BC лучом и прямой, параллельной оси  $Ox$  (рис. 4).

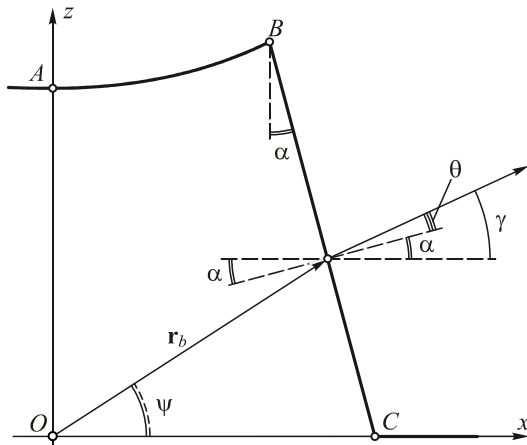


Рис. 4. Преломление на поверхности BC оптического элемента

После подстановки выражений (6), (7) в уравнение (5) и переноса производной  $\frac{dl}{d\psi}$  в левую часть уравнения получим

$$\begin{aligned} \frac{dl}{d\psi} = & \left[ \frac{dr_{BC}}{d\psi} \sin(\psi + \beta_{EF}) + r_{BC} \cos(\psi + \beta_{EF}) + \right. \\ & \left. + l \frac{d\gamma}{d\psi} \cos(\psi + \beta_{EF}) - \frac{dr_{AB}}{d\psi} \right] / [n - \sin(\psi + \gamma)]. \end{aligned} \quad (8)$$

Уравнение (8) содержит в правой части функции  $r_{BC}(\psi), r'_{BC}(\psi), \gamma(\psi), \gamma'(\psi)$ , которые можно считать известными, так как нам известна форма части BC профиля. Функция лучевого соответствия  $\beta_{EF}(\psi)$  может быть определена, как и в случае поверхности AB, из закона сохранения светового потока. Таким образом, задача расчёта профиля оптического элемента, изображённого на рис. 1, имеет точное решение, которое сводится к численному интегрированию независимых линейных дифференциальных уравнений (1), (4), (8), разрешённых относительно производных. Как уже упоминалось выше, данная операция может быть выполнена с помощью метода Рунге–Кутты [8].

### 2. Расчёт оптических элементов при протяжённом источнике излучения

Уравнения (1), (4), (8), были получены для приближения точечного источника излучения. Рассмотрим оптимизационный метод, позволяющий рассчитать части AB и EF профиля оптического элемента с учётом размеров источника.

В качестве начального приближения при оптимизации будем использовать оптический элемент, полученный интегрированием уравнений (1), (4), (8). Параметризуем части AB и EF, аппроксимировав их кубическими сплайнами. В этом случае форма оптического элемента полностью определяется параметрами сплайнов, а именно: значениями функции  $z_i$  и её производной  $z'_i$  в узлах сплайновой сетки  $x_i$ . В качестве функции ошибки будем использовать относительное среднеквадратическое отклонение (ОСКО) формируемого распределения освещённости в выходной плоскости:

$$\epsilon(\mathbf{c}) = \frac{1}{E_0} \sqrt{\frac{1}{\|S\|} \int_S (E(u, v; \mathbf{c}) - E_0(u, v))^2 du dv}, \quad (9)$$

где  $S$  – освещаемая область,  $\|S\|$  – её площадь,  $E_0(u, v)$  – требуемое распределение освещённости,  $\overline{E_0}$  – его среднее значение,  $E(u, v; \mathbf{c})$  – распределение освещённости, формируемое оптическим элементом с вектором параметров  $\mathbf{c}$ .

Решение данной оптимизационной задачи даже при небольшом числе оптимизируемых параметров приводит к многократному вычислению функции

ошибки (9). Для вычисления формируемого распределения освещённости  $E(u, v; c)$ , входящего в выражение (9), необходимо использовать процедуру трассировки лучей [11]. Классические реализации данной процедуры обладают высокой вычислительной сложностью, например, в коммерческом программном обеспечении TracePro® для оценки формируемого распределения освещённости при ста тысячах лучей требуется порядка нескольких минут. Время всей оптимизации в TracePro® может занимать десятки или сотни часов, в зависимости от сложности задачи. Ниже предложен метод быстрой трассировки лучей, позволяющий существенно сократить время расчёта распределения освещённости и, как следствие, уменьшить время оптимизации.

### 3. Метод быстрой трассировки

Большинство техник трассировки лучей основаны на аппроксимации оптических поверхностей набором примитивов и последующем поиске точек пересечения трассируемых лучей с полученными примитивами. В коммерческом программном обеспечении (TracePro®, LightTools®) в качестве примитивов используются NURBS-сплайны [12, 13], позволяющие с высокой точностью аппроксимировать поверхности при небольшом количестве сегментов сплайна. Недостатком данного подхода является высокая вычислительная сложность поиска точки пересечения луча и поверхности. Другой распространённый метод трассировки лучей заключается в представлении поверхностей набором треугольников и построении на их основе k-мерного бинарного дерева. Для достаточно точного представления оптических поверхностей число треугольников должно составлять от нескольких десятков до нескольких сотен тысяч, что в конечном итоге также приводит к большой вычислительной сложности задачи трассировки. В данной работе предлагается использовать представленный ниже метод трассировки лучей через осесимметричные поверхности, основанный на представлении поверхностей набором усечённых конусов. В этом случае общее количество примитивов составляет несколько десятков, а сама процедура трассировки занимает время порядка одной секунды.

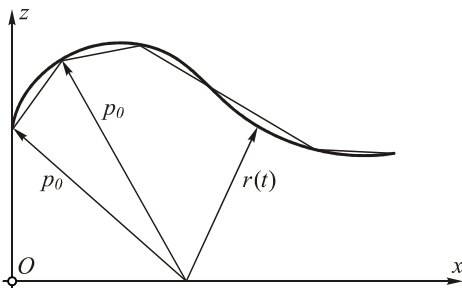


Рис. 5. Аппроксимация кривой  $\mathbf{r}(t)$  ломаной линией

Рассмотрим расчёт усечённых конусов для случая поверхности вращения вокруг оси  $Oz$ , профиль

которой задаётся кривой  $\mathbf{r}(t) = (x(t), z(t))$  с кривизной  $R(t)$ , где  $t$  — натуральный параметр. Эта кривая может быть аппроксимирована ломаной линией с точностью  $\delta$  по следующему алгоритму (рис. 5):

1. Выбираем начальную точку ломаной линии  $\mathbf{p}_0$ , совпадающую с началом  $t_0 = 0$  кривой  $\mathbf{r}(t)$ .
2. Рассчитываем приращение натурального параметра по формуле

$$\Delta t_i = \sqrt{8R(t_i)}\delta. \tag{10}$$

3. Если значение  $t_i + \Delta t_i$  больше длины кривой, в качестве конечного узла  $\mathbf{p}_{i+1}$  ломаной выбирается конечная точка кривой и процесс аппроксимации завершается. В противном случае в качестве следующего узла ломаной  $\mathbf{p}_{i+1}$  используется точка  $\mathbf{r}(t_i + \Delta t_i)$  и аппроксимация продолжается с шага 2.

После расчёта всех узлов  $(x_i, z_i)$  профиля усечённые конусы (кольца), представляющие поверхность оптического элемента, определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} x^2 + y^2 &= (k_i z + b_i)^2, \\ z_i &\leq z \leq z_{i+1}, \\ k_i &= \frac{x_{i+1} - x_i}{z_{i+1} - z_i}, \\ b_i &= x_i - k_i z_i. \end{aligned} \tag{11}$$

Профиль оптического элемента на рис. 1 состоит из шести частей. Для аппроксимации поверхности оптического элемента усечёнными конусами преобразуем части  $AB$  и  $EF$  профиля в ломаные. Отметим, что части поверхности  $BC$ ,  $CD$ ,  $DE$ ,  $FG$  и  $GH$  являются или плоскими ( $CD$  и  $GH$ ), или коническими ( $BC$ ), или цилиндрическими ( $DE$ ,  $FG$ ). Таким образом, приближение поверхности оптического элемента набором усечённых конусов позволяет точно представить части  $BC$ ,  $CD$ ,  $DE$ ,  $FG$  и  $GH$ , что является дополнительным преимуществом данной трассировки.

Поиск точки пересечения луча и  $i$ -го усечённого конуса сводится к решению следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = (k_i z + b_i)^2, \\ x = x_0 + s_x t, \\ y = y_0 + s_y t, \\ z = z_0 + s_z t, \\ z_i \leq z \leq z_{i+1}, \end{cases} \tag{12}$$

где  $(x_0, y_0, z_0)$  — это координаты начала луча, а  $(s_x, s_y, s_z)$  — координаты его единичного вектора. После подстановки последних трёх уравнений сис-

темы (12) в первое получим квадратное уравнение относительно  $t$  :

$$\begin{aligned}
 At^2 + Bt + C &= 0, \\
 A &= s_x^2 + s_y^2 - k_i^2 s_z^2, \\
 B &= 2(x_0 s_x + y_0 s_y - k_i^2 z_0 s_z - k_i b_i s_z), \\
 C &= x_0^2 + y_0^2 - k_i^2 z_0^2 - b_i^2 - 2k_i b_i z_0.
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

Необходимо отметить, для частей  $CD$  и  $GH$  поверхности оптического элемента коэффициенты  $B$ ,  $C$  уравнения (13) не определены, так как в этом случае усечённые конусы вырождаются в плоские поверхности, ограниченные двумя концентрическими окружностями. Точка пересечения для этих частей определяется из решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases}
 x = x_0 + s_x t, \\
 y = y_0 + s_y t, \\
 z_i = z_0 + s_z t, \\
 R_i^2 \leq x^2 + y^2 \leq R_{i+1}^2,
 \end{cases}
 \tag{14}$$

где  $R_i$  и  $R_{i+1}$  – радиусы окружностей, ограничивающих плоскую поверхность.

Уравнения (12)–(14) описывают процедуру быстрой трассировки. Несмотря на то, что вычисление точки пересечения сводится к решению квадратного, а не линейного уравнения, как в случае с треугольными примитивами, общее время трассировки уменьшается на несколько порядков в связи с малым числом усечённых конусов.

#### 4. Результаты расчёта оптических элементов

Предложенный выше метод расчёта оптических элементов был реализован в среде программирования Matlab®. На рис. 6 приведён профиль оптического элемента, формирующего равномерное распределение освещённости в круглой области с угловым размером  $60^\circ$  при точечном ламбертовском источнике.

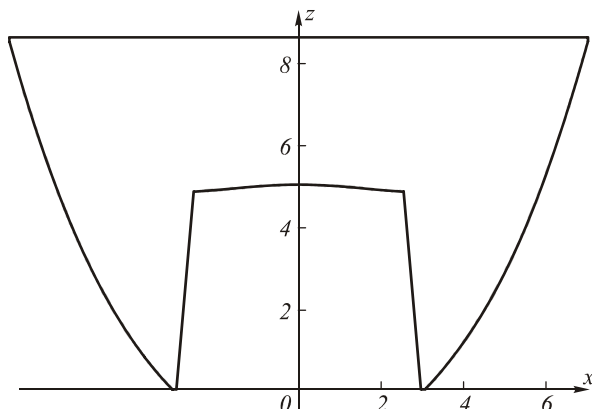


Рис. 6. Профиль оптического элемента, рассчитанного интегрированием уравнений (1), (4), (8)

Профиль на рис. 6 рассчитан с помощью выражений (1), (4), (8), высота оптического элемента составляет 8,6 мм, а его диаметр – 14,0 мм. При расчё-

те предполагалось, что показатель преломления оптического элемента  $n = 1,493$ .

На рис. 7 показано промоделированное распределение освещённости, формируемое оптическим элементом на расстоянии  $z = 10$  м от точечного ламбертовского источника для 500 000 лучей. Световая эффективность элемента составляет 91,7 %, а ОСКО формируемого распределения – 2 %. Отметим, что полученное значение световой эффективности является близким к максимально достижимому (92,16 %), так как даже в случае нормального падения на преломляющую поверхность 4 % светового потока отражается вследствие френелевских потерь.

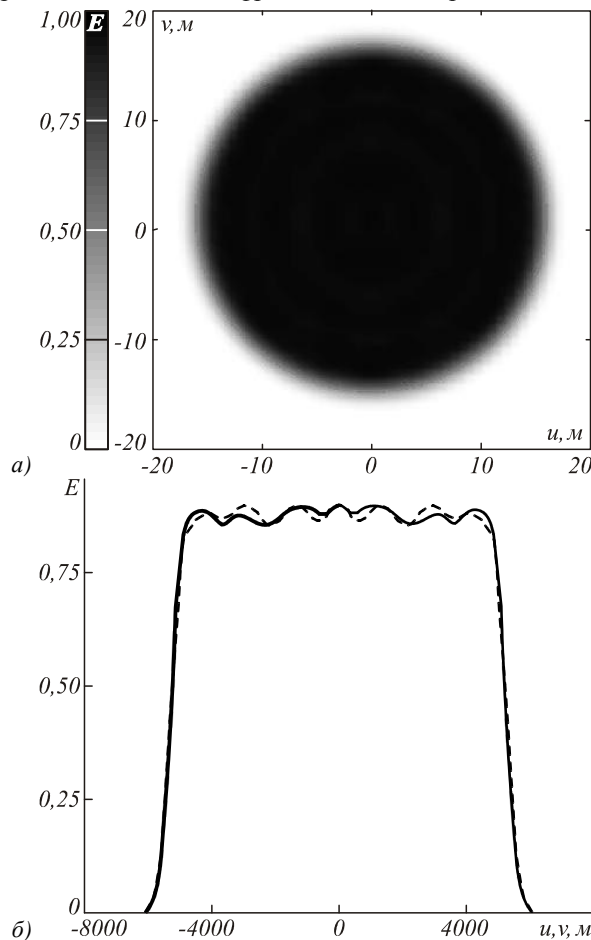


Рис. 7. Распределение освещённости, формируемое профилем оптического элемента на рис. 6 при точечном источнике излучения. Полутоновое распределение освещённости (а); профили распределения освещённости (б)

На рис. 8 приведены результаты моделирования формируемого распределения освещённости при протяжённом источнике излучения  $1 \times 1 \text{ мм}^2$  для 500 000 лучей. Полученное распределение освещённости не является равномерным, уровень освещённости в центре составляет порядка 60 % от требуемого, а ОСКО превышает 12 %.

Приведённые на рис. 8 результаты моделирования оптического элемента, рассчитанного из уравнений (1), (4), (8), подтверждают необходимость ис-

пользования оптимизационного метода для учёта размеров источника.

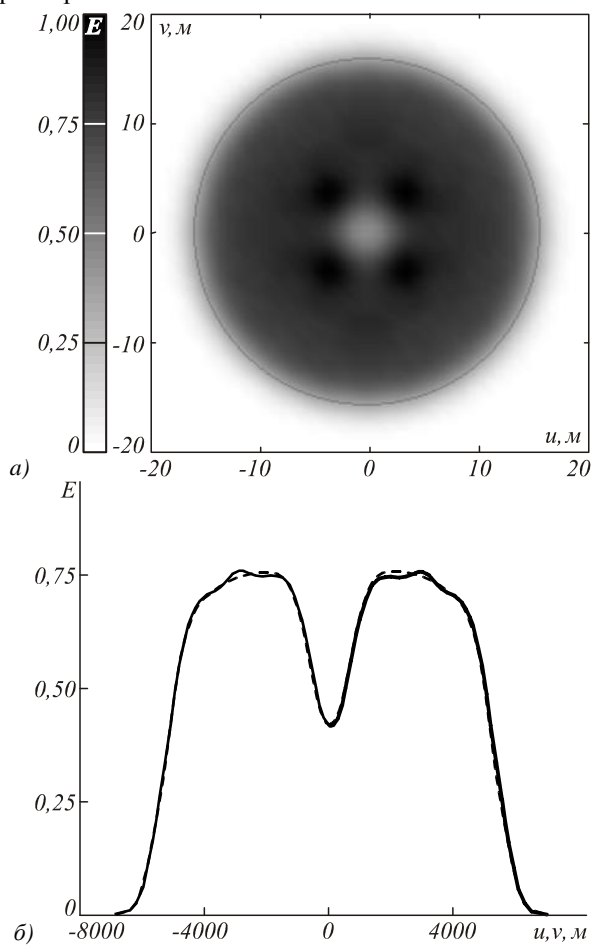


Рис. 8. Распределение освещённости, формируемое профилем оптического элемента на рис. 6 при протяжённом источнике излучения. Полутоновое распределение освещённости (а); профили распределения освещённости (б)

Поверхности *AB* и *EF* были представлены сплайнами с 2 и 3 сегментами, соответственно. Таким образом, задача расчёта была сведена к задаче оптимизации с 10 параметрами. При вычислении функции ошибки использовалась трассировка (12) – (14) для 10000 лучей. В качестве оптимизационного метода использовался метод последовательного квадратичного программирования, реализованный в пакете Optimization Toolbox среды программирования Matlab®. После выполнения 20 итераций оптимизационный процесс был прерван, функция ошибки (9) в ходе оптимизации была вычислена 1343 раза, а время оптимизации составило 13 минут на компьютере с процессором Intel Core i3. Таким образом, среднее время вычисления функции ошибки, включающее трассировку 10 000 лучей, составило 0,58 секунды. Для сравнения, трассировка 10 000 лучей в коммерческом программном обеспечении TracePro® для этого же оптического элемента занимает 32 с, следовательно, вся оптимизация при использовании данного программного обеспечения заняла бы порядка 12 часов.

На рис. 9 приведено распределение освещённости, формируемое оптическим элементом с оптимизированной поверхностью и промоделированное на расстоянии  $z = 10$  м от протяжённого источника при 500000 лучей. Световая эффективность оптического элемента после оптимизации составляет 91,5 %, а ОСКО – менее 4 %, что свидетельствует о хорошей работоспособности разработанного оптимизационного метода.

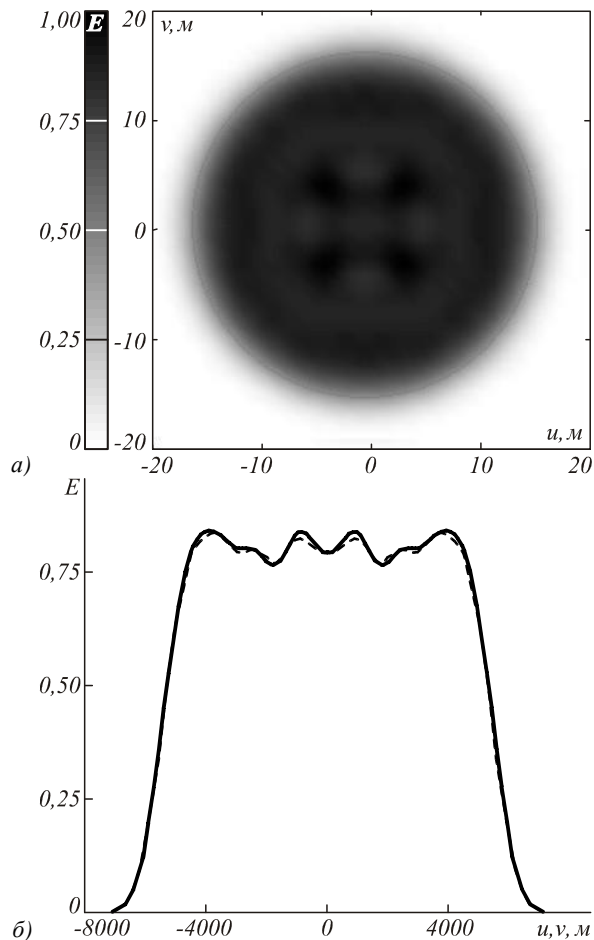


Рис.9. Распределение освещённости для прооптимизированной поверхности оптического элемента при протяжённом источнике излучения. Полутоновое распределение освещённости (а); профили распределения освещённости (б)

**Заключение**

В данной работе представлен оптимизационный метод расчёта оптических элементов, содержащих поверхности, работающие по принципу полного внутреннего отражения. Для расчёта начального приближения получено точное решение данной задачи для случая точечного источника. Процедура быстрой трассировки лучей, используемая в оптимизационном методе при вычислении функции ошибки, позволяет оценить формируемое распределение освещённости менее, чем за одну секунду, что существенно сокращает время оптимизации.

С помощью разработанного метода был рассчитан и промоделирован оптический элемент, форми-

рующий равномерное распределение в круглой области с угловым размером  $60^\circ$ . Время оптимизации составило 13 минут. Относительное среднеквадратичное отклонение формируемого распределения не превышает 4 % от равномерного, а световая эффективность оптического элемента составляет более 91 %, что свидетельствует о хорошей работоспособности предложенного метода.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 12-07-31116\_мол\_а, 12-07-31055\_мол\_а, 12-07-31193\_мол\_а, 13-07-97001-р\_поволжье\_а, 12-07-13113-офи\_м\_РЖД.

### Литература

1. [http://lambdaires.com/software\\_products/tracepro/](http://lambdaires.com/software_products/tracepro/)
2. [http://www.opticalres.com/lt/ltprodds\\_f.html](http://www.opticalres.com/lt/ltprodds_f.html)
3. **Vazquez-Molini, D.** High-efficiency light-emitting diode collimator / D. Vazquez-Molini, M. Gonzalez-Montez, A. Alvarez, E. Bernabeu // Opt. Eng. – 2010. – Vol. 49, N 12. – P. 123001. – ISSN 0091-3286.
4. **Zhenrong, Zh.** Freeform surface lens for LED uniform illumination / Zh. Zhenrong, H. Xiang, L. Xu // Applied Optics. – 2009. – Vol. 48, N 35. – P. 6627-6634. – ISSN 0003-6935.
5. **Jiang, J.** Optical design of a freeform TIR lens for LED streetlight / J. Jiang, S. To, W.B. Lee, B. Cheung // Optik. – 2010. – Vol. 121. – P. 1761-1765. – ISSN 0030-4026.
6. **Li, S.** Design of a compact modified total internal reflection lens for high angular color uniformity / S. Li, F. Chen, K. Wang // Applied Optics. – 2012. – Vol. 51, N 36 – P. 8557-8562. – ISSN 0003-6935.
7. **Моисеев, М.А.** Расчёт оптических элементов, работающих по принципу полного внутреннего отражения и формирующих заданные световые распределения в круглых областях / М.А. Моисеев, Л.Л. Досколович, Е.В. Бызов, С.В. Кравченко // Компьютерная оптика. – 2012. – Т. 36, № 3. – С. 333-340. – ISSN 0134-2452.
8. **Бахвалов, Н.С.** Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – М.: Бинном, 2001. – 636 с.
9. Дифракционная компьютерная оптика / под ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2007. – 736 с.
10. **Борн, М.** Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф — М.: Наука, 1973.
11. **Spencer, G.H.** General ray-tracing procedure / G.H. Spencer, M.V.R.K. Murty // J. Opt. Soc. Am. A. – 1962. – Vol. 52, Issue 6. – P. 672-676.
12. **Piegl, L.** The NURBS Book / L. Piegl and W. Tiller. – Springer, 2nd edition, 1997.
13. **Aber, O.** Direct and Fast Ray Tracing of NURBS Surfaces / O. Abert, M. Geimer, S. Muller // IEEE Symposium on Interactive Ray Tracing. – 2006. – P. 161-168. – ISBN 1-4244-0693-5.

### References

1. [http://lambdaires.com/software\\_products/tracepro/](http://lambdaires.com/software_products/tracepro/)
2. [http://www.opticalres.com/lt/ltprodds\\_f.html](http://www.opticalres.com/lt/ltprodds_f.html)
3. **Vazquez-Molini, D.** High-efficiency light-emitting diode collimator / D. Vazquez-Molini, M. Gonzalez-Montez, A. Alvarez, E. Bernabeu // Opt. Eng. – 2010. – Vol. 49, N 12. – P. 123001. – ISSN 0091-3286.
4. **Zhenrong, Zh.** Freeform surface lens for LED uniform illumination / Zh. Zhenrong, H. Xiang, L. Xu // Applied Optics. – 2009. – Vol. 48, N 35. – P. 6627-6634. – ISSN 0003-6935.
5. **Jiang, J.** Optical design of a freeform TIR lens for LED streetlight / J. Jiang, S. To, W.B. Lee, B. Cheung // Optik. – 2010. – Vol. 121. – P. 1761-1765. – ISSN 0030-4026.
6. **Li, S.** Design of a compact modified total internal reflection lens for high angular color uniformity / S. Li, F. Chen, K. Wang // Applied Optics. – 2012. – Vol. 51, N 36 – P. 8557-8562. – ISSN 0003-6935.
7. **Moiseev, M.A.** Design of led TIR-optics producing prescribed illuminance distributions in circle regions / M.A. Moiseev, L.L. Doskolovich, E.V. Byzov, S.V. Kravchenko // Computer Optics. – 2012. – Vol. 36(3). – P. 333-340. – ISSN 0134-2452. – (In Russian).
8. **Butcher, J.Ch.** Numerical methods for ordinary differential equations / J.Ch. Butcher. – Chichester: Wiley, 2003. – 428 p.
9. Methods for computer design of diffractive optical elements / ed. V.A. Soifer. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002. – 765 p.
10. **Born, M.** Principles of optics / M. Born, E. Wolf. – Cambridge: Cambridge University Press, 2003. – 952 p.
11. **Spencer, G.H.** General ray-tracing procedure / G.H. Spencer, M.V.R.K. Murty // J. Opt. Soc. Am. A. – 1962. – Vol. 52, Issue 6. – P. 672-676.
12. **Piegl, L.** The NURBS Book / L. Piegl and W. Tiller. – Springer, 2nd edition, 1997.
13. **Aber, O.** Direct and Fast Ray Tracing of NURBS Surfaces / O. Abert, M. Geimer, S. Muller // IEEE Symposium on Interactive Ray Tracing. – 2006. – P. 161-168. – ISBN 1-4244-0693-5.

## OPTIMIZATION METHOD FOR COMPUTATION OF TIR OPTICAL ELEMENTS BASED ON QUICK RAYTRACING PROCEDURE

M.A. Moiseev<sup>1,2</sup>, K.V. Borisova<sup>2</sup>, E.V. Byzov<sup>1,2</sup>, L.L. Doskolovich<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Image Processing Systems Institute of the RAS,

<sup>2</sup> S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (National Research University)

### Abstract

New optimization method for design of axisymmetrical TIR optical elements generating the prescribed narrow-angle irradiance distribution is presented. The method is based on the developed quick raytracing procedure including approximation of the optical surfaces by a set of truncated cones. As an example the optical element producing uniformly illuminated circular region with angular size of  $60^\circ$  is presented. It was computed and simulated for extended Lambert light source  $1 \times 1$  mm. The light efficiency of optical element is 91.5 % and the relative root-mean-square error of generated irradiance distribution is less than 5 %.

**Key words:** LED optical element, secondary optics, total internal reflection, raytracing, optimization of optical surface, narrow-angle light distribution.

*Сведения об авторах*

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

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

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

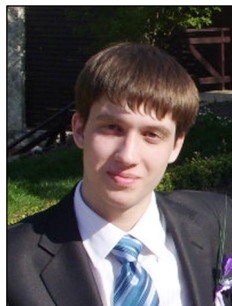
**Mikhail Alexandrovich Moiseev** (b. 1986) graduated with honors (2008) from the Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov (SSAU), majoring in Applied Mathematics and Physics. He received his Philosophy Degree in Physics and Mathematics (2011) from Samara State Aerospace University.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



**Борисова Ксения Валерьевна**, 1992 года рождения. В 2010 году окончила Самарскую областную физико-математическую школу и поступила на первый курс Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва по специальности «Прикладные математика и физика».

E-mail: [ksen.borisova@gmail.com](mailto:ksen.borisova@gmail.com).

**Kseniya Valeryevna Borisova** (b. 1992) finished Samara Region School of Physics and Mathematics in 2010. Currently she is the student of Samara Space Aerospace University, Informatics Department, majoring in Applied Mathematics and Physics.



**Бызов Егор Владимирович**, 1988 года рождения. В 2007 году окончил Лицей имени Д. Кантемира города Кишинёва и в 2008 году поступил на первый курс факультета информатики Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва по специальности «Прикладные математика и физика».

E-mail: [xameak@bigmir.net](mailto:xameak@bigmir.net).

**Egor Vladimirovich Byzov** (b. 1988) finished school named after D. Kantemir in Chishinau in 2007. Currently he is the student of Samara Space Aerospace University, Informatics Department, majoring in Applied Mathematics and Physics.

*Сведения об авторе Досколович Леонид Леонидович – см. стр. 43 этого номера.*

*Поступила в редакцию 11 февраля 2013 г.*