

Расчет оптических элементов при протяженном источнике излучения

Е.В. Бызов^{1,2}, Л.Л. Досколович^{1,2}, С.В. Кравченко¹, М.А. Моисеев¹, Н.Л. Казанский^{1,2}

¹ ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151,

² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34

Аннотация

С использованием ранее разработанного оптимизационного метода [Byzov EV, Kravchenko SV, Moiseev MA, Bezus EA, Doskolovich LL. Optimization method for designing double-surface refractive optical elements for an extended light source. Opt Express 2020; 28(17): 24431-24443. DOI: 10.1364/OE.400609] для протяженного источника излучения рассчитан компактный преломляющий оптический элемент (отношение высоты элемента к размеру источника излучения – 1,55), обеспечивающий формирование равномерного распределения освещенности в смещенной прямоугольной области. Продемонстрировано применение оптимизационного метода в задаче расчета так называемых TIR-элементов, имеющих рабочую поверхность, на которой происходит полное внутреннее отражение лучей. Для протяженного источника излучения рассчитаны компактные TIR-элементы с выходной поверхностью свободной формы, формирующие равномерные распределения освещенности в прямоугольной области. Результаты работы перспективны для применения при решении широкого класса задач расчета компактных оптических элементов для светоизлучающих диодов.

Ключевые слова: поверхность свободной формы, оптимизация, оптика для светодиодов, распределение освещенности, неизображающая оптика, оптический дизайн.

Цитирование: Бызов, Е.В. Расчет оптических элементов при протяженном источнике излучения / Е.В. Бызов, Л.Л. Досколович, С.В. Кравченко, М.А. Моисеев, Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 2023. – Т. 47, № 1. – С. 40-47. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1178.

Citation: Byzov EV, Doskolovich LL, Kravchenko SV, Moiseev MA, Kazanskiy NL. Design of optical elements for an extended light source. Computer Optics 2023; 47(1): 40-47. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1178.

Введение

В настоящее время светоизлучающие диоды (СИД) широко используются в системах освещения различного назначения. При этом формирование заданного светового распределения обеспечивается преломляющим оптическим элементом, который устанавливается непосредственно над СИД. В общем случае задача расчета оптического элемента, формирующего заданное световое распределение, относится к классу обратных задач неизображающей оптики. В приближении точечного источника излучения для решения данной обратной задачи был предложен ряд эффективных методов [1–12]. Для характеристики применимости приближения точечного источника обычно используется параметр « h/d », равный отношению высоты оптического элемента h к размеру светодиода d . При этом решение обратной задачи в приближении точечного источника обычно дает приемлемый результат при $h/d > 5$. В то же время большой интерес представляет дизайн компактных оптических элементов для мощных СИД, имеющих излучающий элемент относительно большого размера. В этом случае отношение h/d может быть около двух или даже меньше. Для столь малых значений h/d решение, полученное в рамках приближения точечного

источника, как правило, сильно отличается от оптимального решения.

Обратные задачи расчета оптических элементов при размерном источнике являются существенно более сложными. Для решения указанных задач были предложены различные оптимизационные методы [13–18], а также т.н. методы «краевого луча» [19–24], использующие при расчете поверхности оптического элемента пучки лучей, выходящие из краевых точек источника излучения. По мнению авторов настоящей работы, наиболее значимым методом в категории методов «краевого луча» является метод «подстроенных» волновых фронтов (ПВФ, англ. wavefront tailoring method), опубликованный в высокорейтинговом журнале Optica в 2019 году [24]. Данный метод основан на преобразовании «входящих» волновых фронтов, испускаемых из краевых точек источника излучения, в «исходящие» волновые фронты, обеспечивающие формирование заданного светового распределения. Представленный в [24] пример расчета компактного оптического элемента ($h/d \sim 1,6$) с двумя поверхностями свободной формы, формирующего сглаженное равномерное распределение в квадратной области, демонстрирует высокие рабочие характеристики метода ПВФ. В то же время метод ПВФ имеет ряд существенных ограничений и приме-

ним только если формируемое распределение освещенности задано в области квадратной формы, расположенной в дальней зоне.

В 2020 году авторами данной статьи был предложен оптимизационный метод расчета преломляющих оптических элементов с двумя «рабочими» поверхностями для случая протяженного источника [25]. В рамках метода поверхности оптического элемента задаются в параметрическом виде в базисе бикубических сплайнов. Коэффициенты сплайнов рассматриваются как параметры оптимизации критерия, представляющего отклонение формируемого распределения освещенности от требуемого распределения. Для минимизации критерия используется квазиньютоновский метод. Предложенный метод [25] применялся для расчета компактных оптических элементов ($h/d=1,6$), формирующих постоянную освещенность в квадратной области в ближней и дальней зонах. Рабочие характеристики оптических элементов, рассчитанных разработанным оптимизационным методом, превосходят рабочие характеристики элементов, рассчитанных методом ПВФ (см. сравнение методов в [25, 26]).

В 2021 году в работе [27] был предложен эффективный метод расчета оптических элементов, основанный на представлении распределения освещенности, формируемого при протяженном источнике, в виде пространственно-неинвариантной свертки распределения освещенности от точечного источника с некоторой функцией ядра, описывающей «размытие» формируемого распределения вследствие протяженного характера источника. Расчет элемента в [27] осуществляется итерационным методом. На каждой итерации метода оценивается функция ядра с использованием метода обратной трассировки лучей, далее численно решается уравнение свертки для оценки распределения освещенности, которое должно быть сформировано при точечном источнике, и затем решается обратная задача формирования полученного распределения освещенности при точечном источнике. Далее метод работы [27] будем называть методом компенсации размытия. В качестве наиболее сложного примера, демонстрирующего возможности метода, авторы работы [27] рассчитали компактный оптический элемент с двумя рабочими поверхностями ($h/d=2,09$), формирующий сглаженное равномерное распределение освещенности в смещенной прямоугольной области.

Как отмечено выше, оптимизационный метод [25] (как и метод ПВФ) ранее использовался только для расчета компактных оптических элементов, формирующих постоянную освещенность в квадратной области. Данная задача обладает большим числом симметрий и поэтому является относительно простой. В настоящей статье рассмотрено применение оптимизационного метода в задаче формирования более сложного распределения освещенности, заданного в смещенной прямоугольной области, и представлено

сравнение рабочих характеристик рассчитанного элемента с результатами работы [27]. Оптимизационный метод [25] также впервые применен в задаче расчета т.н. TIR-элементов, формирующих равномерное распределение освещенности прямоугольной области. Под TIR-элементами (от англ. total internal reflection) понимаются оптические элементы, имеющие рабочую поверхность, на которой происходит полное внутреннее отражение [28–32]. Такая TIR-поверхность позволяет «поворачивать» лучи на большие углы, что даёт возможность использовать TIR-элементы для формирования световых распределений, имеющих относительно небольшой угловой размер [28–32]. Такие «узкоугольные» распределения освещенности требуются в системах прожекторного и прожекторного типов, автомобильных фарах, системах архитектурного и дорожного освещения. Важно отметить, что в указанных системах использование мощных СИД, имеющих излучающие элементы большого размера, является актуальным. При этом в настоящее время нет работ, в которых рассматривается расчет TIR-элементов с учетом существенно протяженного характера источника излучения.

1. Расчет оптического элемента с двумя рабочими поверхностями, формирующего постоянное распределение освещенности в смещенной прямоугольной области

Как отмечено во введении, оптимизационный метод [25] ранее использовался только для расчета компактных оптических элементов, формирующих постоянную освещенность в квадратной области. В данном параграфе рассмотрен пример использования метода в более сложной задаче формирования постоянного распределения освещенности в смещенной прямоугольной области.

Для полноты изложения приведем сначала краткое описание оптимизационного метода [25]. В рамках метода внутренняя и внешняя поверхности оптического элемента задаются функциями длины радиус-векторов $r_m(\varphi, \psi)$, $m=1,2$, где $\varphi \in [0, 2\pi)$ и $\psi \in [0, \pi/2)$ – полярный и азимутальный углы сферической системы координат. Функции $r_m(\varphi, \psi)$, $m=1,2$, определяются в виде бикубических сплайнов [33], заданных на сетках $\Lambda_m = (\varphi_{m,i}, \psi_{m,j})$, $i=1, \dots, N_m$, $j=1, \dots, M_m$. Коэффициенты сплайнов выражаются через значения длины радиус-векторов поверхностей $r_{m,i,j} = r_m(\varphi_i, \psi_j)$, значения первых производных

$$r_{m,i,j}^{(\varphi)} = \frac{\partial r_m}{\partial \varphi}(\varphi_i, \psi_j), \quad r_{m,i,j}^{(\psi)} = \frac{\partial r_m}{\partial \psi}(\varphi_i, \psi_j)$$

и значения смешанных производных

$$r_{m,i,j}^{(\varphi\psi)} = \frac{\partial^2 r_m}{\partial \varphi \partial \psi}(\varphi_i, \psi_j)$$

в узлах сеток $\Lambda_m, m=1,2$ [34]. Обозначим

$$\mathbf{c}_m = (r_{m,i,j}, r_{m,i,j}^{(\varphi)}, r_{m,i,j}^{(\psi)}, r_{m,i,j}^{(\varphi\psi)}), m = 1, 2,$$

вектора из параметров сплайнов для первой и второй поверхности. Поскольку формируемое оптическим элементом распределение освещенности в выходной плоскости (т.е. в плоскости, в которой требуется сформировать заданное распределение освещенности) определяется параметрами сплайнов $\mathbf{c} = (\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2)$, то обозначим это распределение $E(\mathbf{u}; \mathbf{c})$, где $\mathbf{u} = (u, v)$ – декартовы координаты в выходной плоскости.

Обратная задача расчета оптического элемента формулируется в [25] как задача минимизации функции $\varepsilon(\mathbf{c}) = \varepsilon(\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2)$, представляющей среднеквадратичное отклонение формируемого элементом распределения освещенности $E(\mathbf{u}; \mathbf{c})$ от требуемого распределения $E_t(\mathbf{u})$. Для решения задачи оптимизации

$$\varepsilon(\mathbf{c}) \rightarrow \min_{\mathbf{c}}$$

используется квазиньютоновский метод Бройдена–Флетчера–Гольдфарба–Шанно (BFGS), реализованный в пакете Matlab в функции `fminunc`. Отметим, что вычисление функции $\varepsilon(\mathbf{c})$ сводится к расчету распределения освещенности $E(\mathbf{u}, \mathbf{c})$, формируемого оптическим элементом при заданном векторе параметров \mathbf{c} . Метод расчета освещенности $E(\mathbf{u}, \mathbf{c})$ подробно рассмотрен в [25, 26] и основан на методе трассировки лучей. Для ускорения расчета точек пересечения лучей с поверхностями элемента выполняется триангуляция поверхностей элемента $r_m(\varphi, \psi)$, $m = 1, 2$, и упорядочивание элементов триангулированных поверхностей в виде kd-дерева.

С использованием описанного оптимизационного метода [25] был рассчитан оптический элемент (показатель преломления материала $n = 1,49$), формирующий в выходной плоскости $z = 1000$ мм сглаженное равномерное распределение освещенности в прямоугольной области при квадратном ламбертовском источнике излучения с размером 14×14 мм², расположенном в плоскости $z = 0$. Формируемое распределение является постоянным в прямоугольнике 3000×2000 мм² и затем плавно спадает. Центр освещаемой прямоугольной области расположен со смещением относительно начала координат вдоль оси ординат на 300 мм. Поперечные сечения требуемого распределения освещенности показаны пунктирными линиями на рис. 1а. При этом требуемое двумерное распределение $E_t(\mathbf{u})$ соответствует произведению одномерных профилей (сечений) на рис. 1г.

Отметим, что указанные выше параметры формируемого распределения и источника излучения были выбраны для сравнения оптимизационного метода [25] с методом компенсации размытия из статьи [27], в которой рассмотрен расчет оптического элемента, формирующего аналогичное распределение освещенности при таких же размерах источника излучения. Заметим также, что распределения освещенности та-

кого вида часто встречаются в задачах расчета светотехнических устройств для наружного освещения (улицы, парки, промышленные зоны).

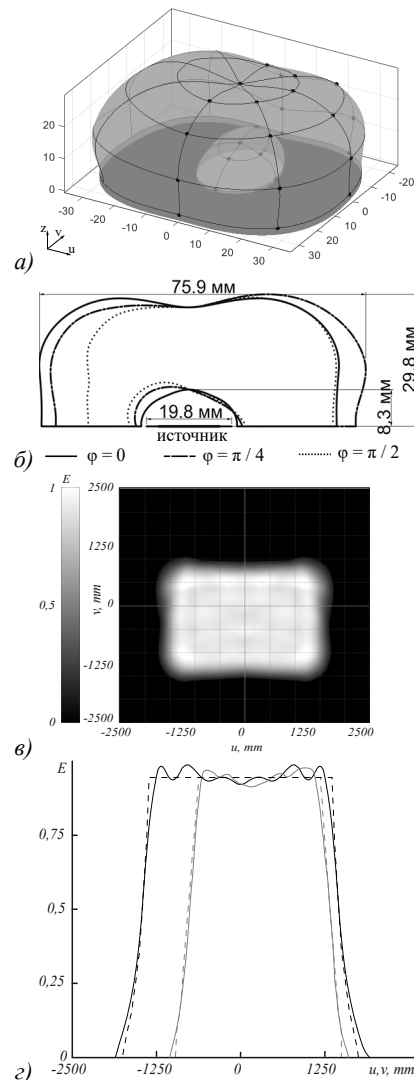


Рис. 1. (а) Рассчитанный оптический элемент ($h/d = 1,51$) для формирования равномерного распределения освещенности в смещенной прямоугольной области с размерами 3000×2000 мм² в плоскости $z = 1000$ мм при ламбертовском источнике с размером 14×14 мм². (б) Сечения оптического элемента и источника излучения в плоскостях, соответствующих полярным углам $\varphi = 0, \pi/4, \pi/2$. (в) Рассчитанное в программе TracePro нормированное распределение освещенности, формируемое оптическим элементом. (г) Сечения формируемого распределения в плоскостях $u = 0, v = 0$ (непрерывные линии) и профили требуемого распределения (пунктирные линии)

Оптический элемент, рассчитанный оптимизационным методом, показан на рис. 1а. На рис. 1б показаны сечения элемента и источника излучения в нескольких плоскостях. При этом указанный на рис. 1б размер сечения источника 19,8 мм соответствует плоскости $\varphi = \pi/4$ и равен длине диагонали квадратного источника 14×14 мм². Отметим, что в рассматриваемой задаче формируемое распределение освещенно-

сти, заданное в смещенной прямоугольной области, является симметричным относительно плоскости $u=0$. В силу этой симметрии бикубические сплайны, задающие поверхности оптического элемента, оптимизировались только в области $\varphi \in [-\pi/2, \pi/2]$. Координатные линии поверхностей элемента на рис. 1а показывают использованные при расчете сплайновые сетки. Оптимизируемые узлы сплайнов, представляющих внутреннюю и внешнюю поверхности элемента при $\varphi \in [-\pi/2, \pi/2]$, отмечены жирными точками. При расчете элемента число оптимизируемых параметров сплайнов составило 19 для внутренней поверхности и 103 для внешней. В процессе минимизации функция $\varepsilon(\mathbf{c})$ была вычислена 24288 раз, при этом полное время расчета элемента на персональном компьютере Intel Core i7-3770 составило около 7 часов.

Для проверки правильности выполненных расчетов рассчитанный оптический элемент был промоделирован в коммерческом программном обеспечении TracePro [35]. Рассчитанное в программе TracePro распределение освещенности (рис. 1в, з), формируемое оптическим элементом, хорошо совпадает с требуемым распределением освещенности, сечения которого показаны пунктирными линиями на рис. 1з. Относительное среднеквадратичное отклонение (СКО) формируемого распределения от заданного составляет всего 7,3% (рис. 1з).

Для сравнения рабочих характеристик рассчитанного элемента с элементом из работы [27], рассчитанным методом компенсации размытия, были вычислены отношение E_{av}/E_{max} средней и максимальной освещенности в заданной прямоугольной области (данный параметр характеризует равномерность полученного распределения) и значение световой эффективности Eff (доля излученного источником светового потока, вышедшего из элемента). Отметим, что именно такие параметры использовались в [27] для оценки качества работы элемента. Для рассчитанного элемента $E_{av}/E_{max}=0,91$, $Eff=89,4\%$. Для элемента из работы [27] $E_{av}/E_{max}=0,91$, $Eff=89,7\%$. Таким образом, элемент из работы [27] и рассчитанный элемент (рис. 1) имеют фактически одинаковые рабочие характеристики. В то же время рассчитанный элемент, по сравнению с элементом из работы [27], является значительно более компактным (характерные размеры элемента и источника указаны на рис. 1б). Для характеристики компактности элемента в [27] использовался ранее введенный параметр h/d , равный отношению максимальной высоты элемента к максимальному размеру источника излучения. Для элемента из работы [27] $h/d=2,09$, а для рассчитанного элемента $h/d=1,51$. Таким образом, можно сказать, что оптимизационный метод имеет лучшие рабочие характеристики по сравнению с методом компенсации размытия [27], поскольку позволяет рассчитывать значительно более компактные элементы при одинаковых рабочих характеристиках.

2. Расчет TIR-элементов, формирующих постоянное распределение освещенности в прямоугольной области

В данном параграфе рассмотрено применение оптимизационного метода для расчета TIR-элементов (показатель преломления материала $n=1,49$), формирующих в выходной плоскости $z=1000$ мм сглаженное равномерное распределение освещенности в прямоугольной области при квадратном ламбертовском источнике излучения размером 14×14 мм², расположенном в плоскости $z=0$. Из-за способности TIR-поверхности «поворачивать» лучи на большие углы TIR-элементы, как правило, используются для формирования световых распределений, имеющих относительно небольшой угловой размер вдоль одного или обоих направлений осей координат в освещаемой области [28–32]. В связи с этим была рассмотрена задача формирования более «узкоугольного» светового распределения (по сравнению с примером параграфа 1), которое является постоянным в прямоугольнике с размерами 932×536 мм² и затем плавно спадает. Поперечные сечения требуемого распределения освещенности показаны пунктирными линиями на рис. 3в. При этом, как и в предыдущем примере, требуемое двумерное распределение $E_t(\mathbf{u})$ соответствует произведению одномерных профилей (сечений) на рис. 3в.

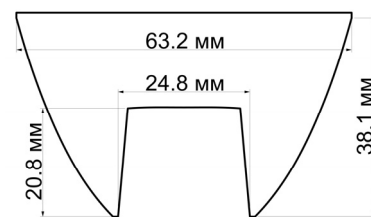


Рис. 2. Профиль осесимметричного TIR-элемента, формирующего при точечном ламбертовском источнике радиально-симметричное распределение освещенности с Гауссовским профилем

Угловые размеры формируемого распределения составляют $50^\circ \times 30^\circ$. Отметим, что такое узкоугольное распределение не может быть эффективно сформировано оптическими элементами без TIR-поверхностей из-за возникающих эффектов полного внутреннего отражения и больших френелевских потерь, обусловленных большими углами девиации лучей на поверхностях элемента [31].

Для расчета TIR-элемента сначала был рассчитан осесимметричный TIR-элемент, формирующий в выходной плоскости $z=1000$ мм при точечном ламбертовском источнике излучения радиально-симметричное распределение освещенности с Гауссовским профилем $E(|\mathbf{u}|) \sim (-|\mathbf{u}|^2/\sigma^2)$, где $2\sigma=734$ мм соответствует среднему арифметическому длин сторон требуемой прямоугольной области. Расчет осесимметричного TIR-элемента подробно описан в [28] и сводится к тривиальной задаче интегрирования трех обыкновен-

ных дифференциальных уравнений 1-го порядка, разрешенных относительно производной. Профиль данного элемента показан на рис. 2. Отметим, что для рассчитанного элемента полное внутреннее отражение лучей происходит на боковой поверхности, которая, как зеркало, перенаправляет лучи в выходную плоскость.

Внешняя (выходная) поверхность радиально-симметричного TIR-элемента является плоской. Для формирования прямоугольной освещаемой области вместо плоской внешней поверхности в TIR-элементе предлагается использовать поверхность свободной формы $z = z_{out}(x, y)$, заданную в виде бикубических сплайнов [33], где $\mathbf{x} = (x, y)$ – декартовы координаты в выходной плоскости TIR-элемента. В общем случае сплайны задаются в квадратной области $R \times R$, где R – радиус выходной области TIR-элемента. Будем считать, что бикубические сплайны заданы на сетке $\Lambda = (x_i, y_j)$, $i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, M$. В этом случае коэффициенты сплайнов выражаются через значения функции $z_{out,i,j} = z_{out}(x_i, y_j)$, значения первых производных

$$z_{out,i,j}^{(x)} = \frac{\partial z_{out}}{\partial x}(x_i, y_j), z_{out,i,j}^{(y)} = \frac{\partial z_{out}}{\partial y}(x_i, y_j)$$

и значения смешанных производных

$$z_{out,i,j}^{(xy)} = \frac{\partial^2 z_{out}}{\partial y \partial x}(x_i, y_j)$$

в узлах сетки Λ [34]. Как и в предыдущем примере, расчет параметров сплайнов

$$\mathbf{c} = (z_{out,i,j}, z_{out,i,j}^{(x)}, z_{out,i,j}^{(y)}, z_{out,i,j}^{(xy)})$$

осуществляется методом BFGS из условия минимизации функции $\epsilon(\mathbf{c})$, представляющей среднеквадратичное отклонение формируемого элементом распределения освещенности $E(\mathbf{u}; \mathbf{c})$ от требуемого распределения $E_t(\mathbf{u})$.

Рассчитанный оптимизационным методом TIR-элемент с внешней поверхностью свободной формы $z = z_{out}(x, y)$ показан на рис. 3а. Отметим, что в рассматриваемой задаче формируемое прямоугольное распределение освещенности является симметричным относительно плоскостей $u = 0, v = 0$. В силу этой симметрии бикубические сплайны, задающие внешнюю поверхность TIR-элемента, оптимизировались только в области 1-го квадранта. При этом оптимизируемые сплайны были заданы на сетке $\Lambda = (x_i, y_j) = ((i-1)R/3, (j-1)R/3)$, где $i = 1, \dots, 4, j = 1, \dots, 4$. Для выбранной сплайновой сетки число оптимизируемых параметров сплайна составило 49. В процессе минимизации функция $\epsilon(\mathbf{c})$ была вычислена более 30000 раз, а полное время расчета элемента на персональном компьютере Intel Core i7-3770 составило около 9 часов.

Для проверки правильности выполненных расчетов рассчитанный оптический элемент был промоделирован в программе TracePro [35]. Рассчитанное

распределение освещенности приведено на рис. 3б и 3в и хорошо совпадает с требуемым распределением. Относительное СКО формируемого распределения от требуемого составляет 7,5%, а значение световой эффективности превышает 87%.

Отметим, что для рассчитанного TIR-элемента параметр компактности h/d составляет 2,62, что значительно больше, чем для элемента в параграфе 1. Это связано с тем, что и при точечном источнике излучения TIR-элементы обычно имеют значительно большую высоту по сравнению с «обычными» оптическими элементами, не содержащими TIR-поверхностей.

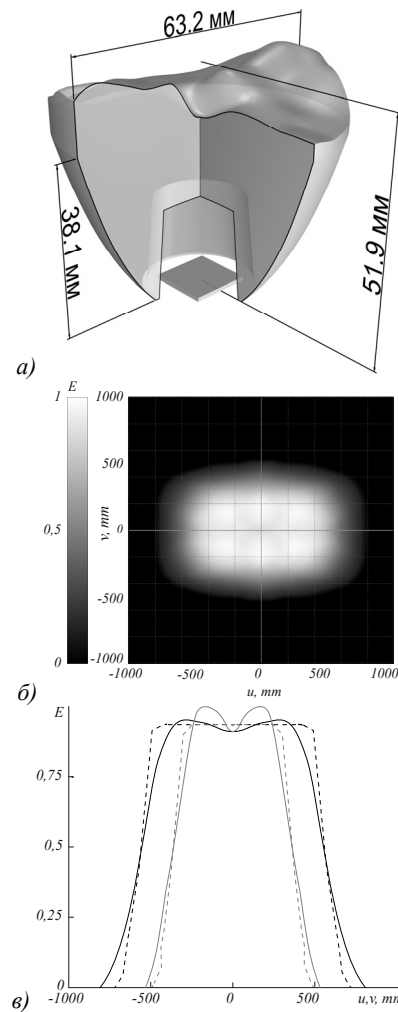


Рис. 3. (а) Рассчитанный TIR- элемент ($h/d = 2,62$) для формирования равномерного распределения освещенности в прямоугольной области с размерами $932 \times 532 \text{ мм}^2$ в плоскости $z = 1000 \text{ мм}$ при ламбертовском источнике с размером $14 \times 14 \text{ мм}^2$; (б) Рассчитанное в программе TracePro нормированное распределение освещенности, формируемое TIR-элементом. (в) Сечения формируемого распределения в плоскостях $v = 0, u = 0$ (непрерывные линии) и профили требуемого распределения (пунктирные линии)

При дальнейшем увеличении размеров TIR-элемента (параметра h/d) можно получить прямоугольное распределение более высокого качества. В

качестве примера на рис. 4 показан рассчитанный TIR-элемент с параметром компактности $h/d = 3,56$. В данном случае формируемое распределение имеет более четкую границу (по сравнению с предыдущим случаем для $h/d = 2,62$), а относительное СКО формируемого распределения от требуемого составляет менее 5%.

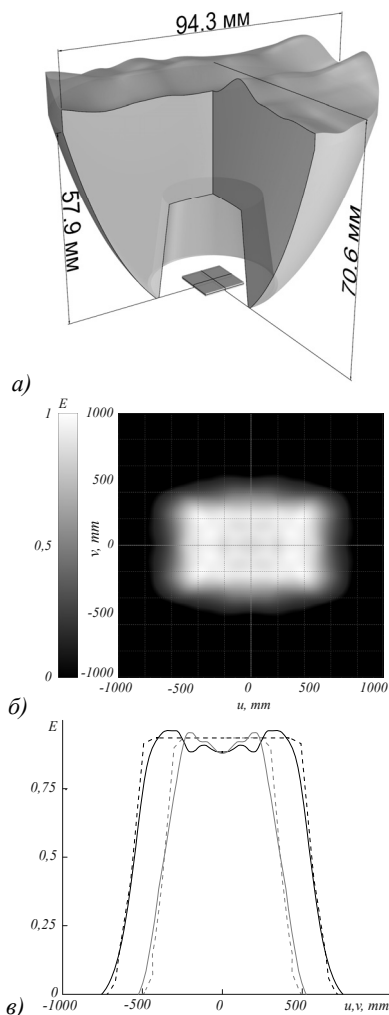


Рис. 4. (а) Рассчитанный TIR- элемент ($h/d = 2,62$) для формирования равномерного распределения освещенности в прямоугольной области с размерами $932 \times 532 \text{ мм}^2$ в плоскости $z = 1000 \text{ мм}$ при ламбертовском источнике с размером $14 \times 14 \text{ мм}^2$; (б) Рассчитанное в программе TracePro нормированное распределение освещенности, формируемое TIR-элементом. (в) Сечения формируемого распределения в плоскостях $v = 0$, $u = 0$ (непрерывные линии) и профили требуемого распределения (пунктирные линии)

Заключение

С использованием оптимизационного метода [25] рассчитан компактный оптический элемент ($h/d = 1,51$), формирующий равномерное распределение освещенности в смещенной прямоугольной области при протяженном источнике излучения. Представлено сравнение рабочих характеристик рассчитанного элемента с элементом из работы [27], рассчи-

танным методом компенсации размытия. Показано, что при равных рабочих характеристиках, рассчитанный оптический элемент является более компактным.

Впервые продемонстрировано применение оптимизационного метода [25] в задаче расчета TIR-элементов, формирующих равномерное распределение освещенности прямоугольной области (угловые размеры – $50^\circ \times 30^\circ$) при протяженном источнике излучения. Показано, что при $h/d > 2,62$ оптимизационный метод обеспечивает расчет TIR-элементов, формирующих постоянное распределение освещенности в прямоугольной области при относительной среднеквадратичной ошибке менее 8%. По мнению авторов статьи, возможность применения оптимизационного метода [25] в задачах дизайна TIR-элементов является важным научным и практическим результатом. Практическая значимость данного результата обусловлена широким применением TIR-элементов с мощными СИД, имеющими излучающие элементы относительно большого размера, а научная значимость – отсутствием работ по методам расчета TIR-элементов при протяженном источнике излучения.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00326).

References

- [1] Wu R, Feng Z, Zheng Z, Liang R, Benítez P, Miñano JC, Duerr F. Design of freeform illumination optics. *Laser Photon Rev* 2018; 12(7): 1700310.
- [2] Wu R, Xu L, Liu P, Zhang Y, Zheng Z, Li H, Liu X. Freeform illumination design: a nonlinear boundary problem for the elliptic Monge–Ampère equation. *Opt Lett* 2013; 38(2): 229–231.
- [3] Mao X, Xu S, Hu X, Xie Y. Design of a smooth freeform illumination system for a point light source based on polar-type optimal transport mapping. *Appl Opt* 2017; 56(22): 6324–6331.
- [4] Wu R, Chang S, Zheng Z, Zhao L, Liu X. Formulating the design of two freeform lens surfaces for point-like light sources. *Opt Lett* 2018; 43(7): 1619–1622.
- [5] Brix K, Hafizogullari Y, Platen A. Designing illumination lenses and mirrors by the numerical solution of Monge–Ampère equations. *J Opt Soc Am A* 2015; 32(11): 2227–2236.
- [6] Yadav NK, ten ThijeBoonkkamp JHM, IJzerman WL. Computation of double freeform optical surfaces using a Monge–Ampère solver: Application to beam shaping. *Opt Commun* 2019; 439: 251–259.
- [7] Schwartzburg Y, Testuz R, Tagliasacchi A, Pauly M. High-contrast computational caustic design. *ACM Trans Graph* 2014; 33(4): 74.
- [8] Olikier V. Controlling light with freeform multifocal lens designed with supporting quadric method(SQM). *Opt Express* 2017; 25(4): A58–A72.
- [9] Doskolovich LL, Bykov DA, Andreev ES, Bezus EA, Olikier V. Designing double freeform surfaces for collimated beam shaping with optimal mass transportation and linear assignment problems. *Opt Express* 2018; 26(19): 24602–24613. DOI: 10.1364/OE.26.024602.

- [10] Daskolovich LL, Bykov DA, Mingazov AA, Bezus EA. Optimal mass transportation and linear assignment problems in the design of freeform refractive optical elements generating far-field irradiance distributions. *Opt Express* 2019; 27(9): 13083-13097. DOI: 10.1364/OE.27.013083.
- [11] Bykov DA, Daskolovich LL, Byzov EV, Bezus EA, Kazanskiy NL. Supporting quadric method for designing refractive optical elements generating prescribed irradiance distributions and wavefronts. *Opt Express* 2021; 29(17): 26304-26318. DOI: 10.1364/OE.432770.
- [12] Daskolovich LL, Byzov EV, Mingazov AA, Karapetian GJ, Smorodin VI, Kazanskiy NL, Bykov DA, Bezus EA. Supporting quadric method for designing freeform mirrors that generate prescribed near-field irradiance distributions. *Photonics* 2022; 9(2): 118. DOI: 10.3390/photonics9020118.
- [13] Luo Y, Feng Z, Han Y, Li H. Design of compact and smooth free-form optical system with uniform illuminance for LED source. *Opt Express* 2010; 18(9): 9055-9063.
- [14] Li Z, Yu S, Lin L, Tang Y, Ding X, Yuan W, Yu B. Energy feedback freeform lenses for uniform illumination of extended light source LEDs. *Appl Opt* 2016; 55: 10375-10381.
- [15] Liu Z, Liu P, Yu F. Parametric optimization method for the design of high-efficiency free-form illumination system with a LED source. *Chin Opt Lett* 2012; 10: 112201-112201.
- [16] Fournier F, Rolland J. Optimization of freeform lightpipes for light-emitting-diode projectors. *Appl Opt* 2008; 47: 957-966.
- [17] Zhao S, Wang K, Chen F, Qin Z, Liu S. Integral freeform illumination lens design of LED based pico-projector. *Appl Opt* 2013; 52: 2985-2993.
- [18] Moiseev MA, Daskolovich LL. Design of refractive spline surface for generating required irradiance distribution with large angular dimension. *J Mod Opt* 2010; 57(7): 536-544. DOI: 10.1080/09500341003764069.
- [19] Wu R, Huang CY, Zhu X, Cheng H-N, Liang R. Direct three-dimensional design of compact and ultra-efficient freeform lenses for extended light sources. *Optica* 2016; 3: 840-843.
- [20] Wu R, Hua H, Benítez P, Miñano JC. Direct design of aspherical lenses for extended non-Lambertian sources in two-dimensional geometry. *Opt Lett* 2015; 40: 3037-3040.
- [21] Hu S, Du K, Mei T, Wan L, Zhu N. Ultra-compact LED lens with double freeform surfaces for uniform illumination. *Opt Express* 2015; 23: 20350-20355.
- [22] Li X, Ge P, Wang H. Prescribed intensity in 3D rotational geometry for extended sources by using a conversion function in 2D design. *Appl Opt* 2017; 56: 1795-1798.
- [23] Li X, Ge P, Wang H. An efficient design method for LED surface sources in three-dimensional rotational geometry using projected angle difference. *Light Res Technol* 2019; 51(3): 457-464.
- [24] Sorgato S, Chaves J, Thienpont H, Duerr F. Design of illumination optics with extended sources based on wavefront tailoring. *Optica* 2019; 6: 966-971.
- [25] Byzov EV, Kravchenko SV, Moiseev MA, Bezus EA, Daskolovich LL. Optimization method for designing double-surface refractive optical elements for an extended light source. *Opt Express* 2020; 28(17): 24431-24443. DOI: 10.1364/OE.400609.
- [26] Byzov EV, Kravchenko SV, Moiseev MA, Daskolovich LL. Optimization method for designing optical elements with an extended light source. *Computer Optics* 2020; 44(5): 712-720. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-762.
- [27] Wei S, Zhu Z, Li W, Ma D. Compact freeform illumination optics design by deblurring the response of extended sources. *Opt Lett* 2021; 46: 2770-2773.
- [28] Moiseev MA, Daskolovich LL. Design of TIR optics generating the prescribed irradiance distribution in the circle region. *J Opt Soc Am A* 2012; 29(9): 1758-1763. DOI: 10.1364/JOSAA.29.001758.
- [29] Tsai, C.Y. Free-form surface design method for a collimator TIR lens / C.Y. Tsai // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2016. – Vol. 33(4). – P. 785-792. – DOI:10.1364/JOSAA.33.000785.
- [30] Zhao Z, Zhang H, Liu S, Wang X. Effective freeform TIR lens designed for LEDs with high angular color uniformity. *Appl Opt* 2018; 57: 4216-4221.
- [31] Andreeva KV, Kravchenko SV, Moiseev MA, Daskolovich LL. Designing freeform TIR optical elements using supporting quadric method. *Opt Express* 2017; 25(19): 23465-23476. DOI: 10.1364/OE.25.023465.
- [32] Ma D, Feng Z, Liang R. Freeform illumination lens design using composite ray mapping. *Appl Opt* 2015; 54: 498-503.
- [33] Shikin EV, Plis LI. Curves and surfaces on a computer screen. Spline guide for users [In Russian]. Moscow: "DIALOG-MIFI" Publisher; 1996.
- [34] Bicubic interpolation. Source: https://en.wikipedia.org/wiki/Bicubic_interpolation.
- [35] TracePro – software for design and analysis of illumination and optical systems. Source: <https://www.lambdare.com/tracepro/>.

Сведения об авторах

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 национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева) по направлению «Прикладная математика и физика». Область научных интересов: методы расчетов формирующей неизображающей оптики для светодиодов. E-mail: egor.byzov@gmail.com.

Досколович Леонид Леонидович, в 1989 году с отличием окончил Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне – Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва) по специальности «Прикладная математика». Доктор физико-математических наук (2001 год), профессор, главный научный сотрудник лаборатории дифракционной оптики Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН) – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, профессор кафедры технической кибернетики Самарского университета и ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории прорывных технологий дистанционного зондирования Земли Самарского университета. Специалист в области дифракционной оптики, лазерных информационных технологий, нанофотоники. E-mail: leonid@ipsiras.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 национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева) по направлению «Прикладные математика и физика». Кандидат физико-математических наук (2018 год). Является членом международного научного общества SPIE. В списке научных трудов С.В. Кравченко 18 публикаций.
E-mail: sergey.kravchenko91@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 национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева) 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: moiseev@ledopticsdesign.com.

Казанский Николай Львович в 1981 году с отличием окончил Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне – Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва (Самарский университет)) по специальности «Прикладная математика». Доктор физико-математических наук (1996 г.), профессор, работает руководителем Института систем обработки изображений РАН – филиала Федерального научно-исследовательского центра «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук, профессором кафедры технической кибернетики Самарского университета. Является членом международных научных обществ OSA, SPIE и IAPR. Н.Л. Казанский – специалист в области оптоинформационных технологий, дифракционной оптики, математического моделирования, обработки изображений и нанофотоники. В списке научных работ Н.Л. Казанского 290 статей, 14 монографий, 57 авторских свидетельств и патентов.
Страница в интернете: <http://www.ipsiras.ru/staff/kazanskiy.htm>. E-mail: kazanskiy@ssau.ru.

ГРНТИ: 29.31.29

Поступила в редакцию 22 июня 2022 г. Окончательный вариант – 28 сентября 2022 г.

Design of optical elements for an extended light source

E.V. Byzov^{1,2}, L.L. Doskolovich^{1,2}, S.V. Kravchenko¹, M.A. Moiseev¹, N.L. Kazanskiy^{1,2}

¹ *IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS,
443001, Samara, Russia, Molodogvardeyskaya 151,*

² *Samara National Research University, 443086, Samara, Russia, Moskovskoye Shosse 34*

Abstract

Using the previously developed optimization method for an extended light source [Byzov EV, Kravchenko SV, Moiseev MA, Bezus EA, Doskolovich LL. Optimization method for designing double-surface refractive optical elements for an extended light source. *Opt Express* 2020; 28(17): 24431-24443. DOI: 10.1364/OE.400609], we designed a compact refractive optical element (the ratio of the element height to the light source size being 1.55) providing a uniform illuminance distribution in a shifted rectangular region. An application of the optimization method for calculating the so-called TIR-elements, exploiting the phenomenon of the total internal reflection of rays, is considered. For an extended light source, compact TIR-elements with freeform exit surfaces that generate uniform illuminance distributions in a rectangular region are designed. The results of the work show promise for a wide class of problems of designing compact optical elements for light-emitting diodes.

Keywords: freeform surface, optimization, secondary optics, illuminance distribution, nonimaging optics, optical design.

Citation: Byzov EV, Doskolovich LL, Kravchenko SV, Moiseev MA, Kazanskiy NL. Design of optical elements for an extended light source. *Computer Optics* 2023; 47(1): 40-47. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1178.

Acknowledgements: This work was supported by Russian Science Foundation (Project No. 18-19-00326).

Authors' information

Egor Vladimirovich Byzov (b. 1988) graduated with honors (2014) from Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov (now – Samara National Research University named after academician S.P. Korolyov), majoring in Applied Mathematics and Physics. Research interests: design methods of nonimaging optics for LEDs. E-mail: egor.byzov@gmail.com.

Leonid Leonidovich Doskolovich graduated with honors (1989) from S.P. Korolyov Kuibyshev Aviation Institute (presently, Samara National Research University), majoring in Applied Mathematics. He received his Doctor in Physics & Maths (2001) degree from Samara National Research 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, nanophotonics. E-mail: leonid@ipsiras.ru.

Sergey Vasilyevich Kravchenko (b. 1991) graduated with honors (2014) from Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov (now – Samara National Research University named after academician S.P. Korolyov), majoring in Applied Mathematics and Physics. He is a co-author of 18 scientific papers. He received his Candidate's Degree in Physics and Mathematics (2018) from Samara State Aerospace University. E-mail: sergey.kravchenko91@gmail.com.

Mikhail Alexandrovich Moiseev (b. 1986) graduated with honors (2008) from S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (now – Samara National Research University named after academician S.P. Korolyov), 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 coauthor of 23 scientific papers and seven inventions and patents. E-mail: moiseev@ledopticsdesign.com.

Nikolay Lvovich Kazanskiy graduated with honors (1981) from Kuibyshev Aviation Institute (presently, Samara National Research University), majoring in Applied Mathematics. He received his Candidate in Physics & Maths (1988) and Doctor in Physics & Mathematics (1996) degrees from Samara National Research University. He is the di-

rector of Image Processing Systems Institute of the RAS - Branch of the Federal Scientific-Research Centre "Crystallography and Photonics" of the Russian Academy of Sciences, also holding a part-time position of a professor at Technical Cybernetics department of Samara National Research University. He is a member of OSA, SPIE and IAPR. He co-authored 290 scientific papers, 14 monographs, 57 inventions and patents. His current research interests include diffractive optics, computer vision, optical sensors, mathematical modeling, lighting devices design, and nanophotonics. Website: <http://www.ipsiras.ru/staff/kazanskiy.htm> . E-mail: kazanskiy@ssau.ru .

Received June 22, 2022. The final version – September 28, 2022.
