

# Расчёт преломляющих оптических элементов для формирования заданных распределения освещенности и волнового фронта

К.В. Андреева<sup>1,2</sup>, Е.С. Андреев<sup>1,2</sup>, Д.А. Быков<sup>1,2</sup>, Л.Л. Досколович<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

<sup>2</sup>Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

**Аннотация.** Рассмотрена задача расчёта преломляющего оптического элемента, преобразующего заданный падающий пучок в выходной пучок с заданным распределением освещённости и заданным волновым фронтом. Волновой фронт выходного пучка определяется через функцию эйконала, заданную в некоторой плоскости за оптическим элементом. В качестве примеров рассчитаны оптические элементы, преобразующие сферический пучок от точечного ламбертовского источника в пучок с постоянной освещённостью и плоским волновым фронтом.

## 1. Введение

В настоящей статье рассматривается задача расчёта осесимметричного преломляющего оптического элемента, преобразующего заданный падающий пучок в выходной пучок с заданным распределением освещённости и заданным волновым фронтом. Волновой фронт выходного пучка определяется через функцию эйконала, заданную в некоторой плоскости за оптическим элементом. В общем случае оптический элемент, осуществляющий такое преобразование, имеет две рабочие поверхности. Указанная задача, как правило, решается в приближении геометрической оптики и имеет ряд важных практических приложений, включающих расчёт формирователей лазерных пучков (англ. – laser beam shapers), систем освещения, интерферометрических систем контроля оптических поверхностей [1–12].

В случае осевой (радиальной) симметрии задачи расчёт оптического элемента сводится к решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений [1–7]. В то же время в известных статьях рассмотрены только частные случаи сформулированной выше задачи, когда волновые фронты падающего и выходного пучков являются плоскими. В недавней работе [7] рассмотрен случай падающего пучка со сферическим волновым фронтом, однако волновой фронт выходного пучка по-прежнему предполагается плоским.

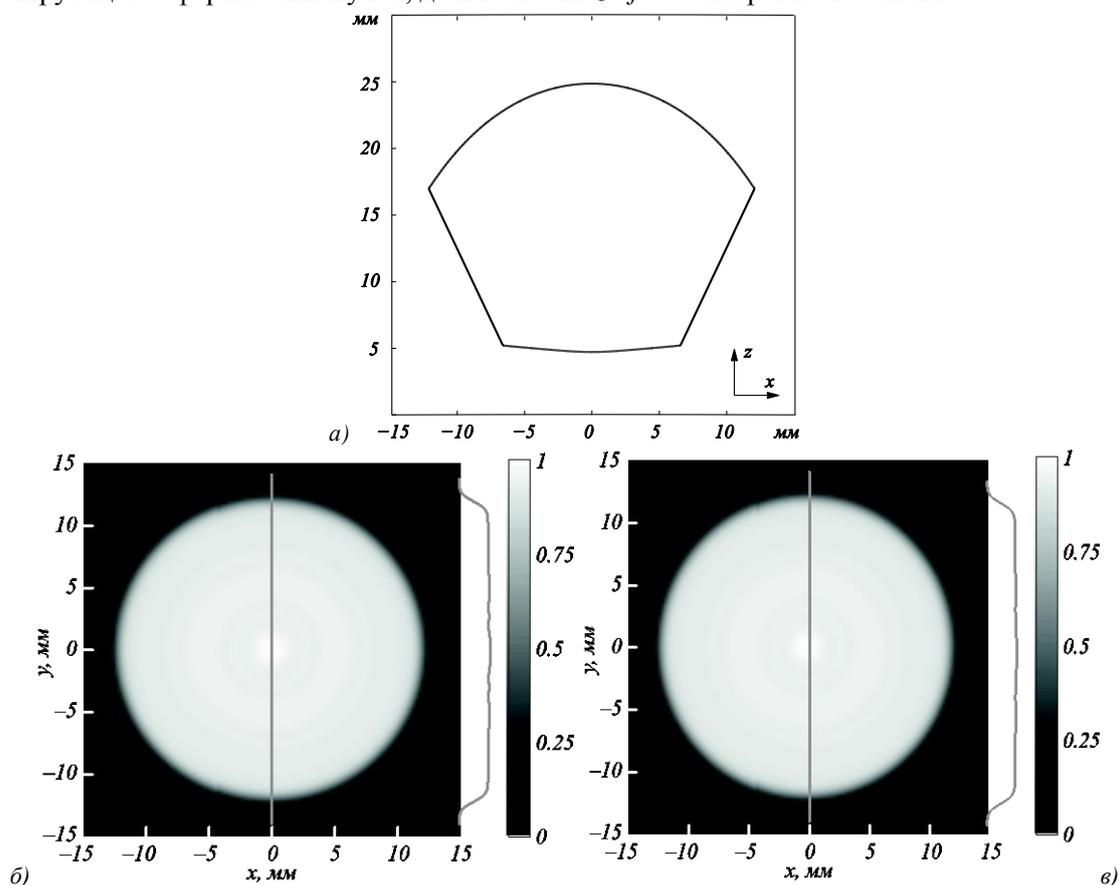
В настоящей статье впервые приведено решение задачи для общего случая, когда падающий пучок имеет произвольный заданный волновой фронт, а выходной пучок, помимо заданного распределения освещённости, имеет заданное распределение эйконала в некоторой плоскости. Задание функции эйконала (оптической длины пути от исходного волнового фронта до некоторой плоскости) эквивалентно заданию направлений лучей в данной плоскости, и, соответственно, формы волнового фронта. Расчёт оптического элемента сведён к решению

двух обыкновенных дифференциальных уравнений, разрешённых относительно производной. В качестве примеров рассчитаны осесимметричные оптические элементы, преобразующие сферический пучок от ламбертовского источника в пучок с постоянной освещённостью и плоским волновым фронтом, а также в пучок с постоянной освещённостью и функцией эйконала, обеспечивающей фокусировку в отрезок оптической оси.

## 2. Расчетный пример

В качестве первого примера рассмотрим расчёт оптического элемента для преобразования пучка со сферическим волновым фронтом, генерируемым точечным источником, излучающим по закону Ламберта, в выходной пучок с постоянной освещённостью и плоским волновым фронтом. Данный пример аналогичен оптическому элементу, рассмотренному в недавней работе [7], и служит для проверки правильности приведённых расчётных формул.

Расчёт элемента производился при следующих параметрах: угловой размер падающего пучка  $\alpha_0 = 50^\circ$ , начальный радиус нижней поверхности  $l_1(0) = 5$  мм, толщина оптического элемента  $h_0 = 20$  мм при  $\alpha = 0$ , показатель преломления материала элемента  $n = 1,6$ , радиус выходного пучка  $r_0 = 12$  мм. При указанных параметрах оптическая длина лучей от источника излучения, формирующего сферический пучок, до плоскости  $z = f = 30$  мм равна  $\Psi = 42$  мм.



**Рисунок 1.** Сечение оптического элемента, преобразующего сферический пучок от ламбертовского источника в пучок с постоянной освещённостью и плоским волновым фронтом (а); рассчитанные в программе TrasePro нормированные распределения освещённости, формируемые оптическим элементом в плоскостях  $z = 20$  мм и  $z = 50$  мм (б, в). Справа показаны сечения распределений освещённости.

Сечение рассчитанного оптического элемента приведено на рис.1а. Для проверки правильности приведённых расчётных формул было проведено моделирование работы оптического элемента в программе для светотехнических расчётов TrasePro с использованием

метода трассировки лучей. На рис. 1б,в показаны рассчитанные в программе TracePro распределения освещённости, формируемые оптическим элементом в плоскостях  $z=30$  мм и  $z=50$  мм. Представленные результаты расчёта показывают формирование круглой области заданного радиуса с фактически постоянной освещённостью. Нормированные СКО рассчитанных распределений освещённости от постоянного значения составляют 5,3% и 6,5% при  $z=20$  мм и  $z=50$  мм, соответственно. Сохранение размера круга при изменении расстояния от оптического элемента показывает, что волновой фронт сформированного элементом пучка близок к плоскому волновому фронту. Действительно, рассчитанное СКО оптической длины пути от постоянного значения при  $z=20$  мм составляет менее 20 нм.

### 3. Литература

- [1] Frieden, B.R. Lossless conversion of a plane laser wave to a plane wave of uniform irradiance / B.R. Frieden // *Applied Optics*. – 1965. – Vol. 4(11). – P. 1400-1403. DOI: 10.1364/AO.4.001400.
- [2] Rhodes, P.W. Refractive optical systems for irradiance redistribution of collimated radiation: their design and analysis / P.W. Rhodes, D.L. Shealy // *Applied Optics*. – 1980. – Vol. 19(20). – P. 3545-3553. DOI: 10.1364/AO.19.003545.
- [3] Hoffnagle, J.A. Design and performance of a refractive optical system that converts a Gaussian to a flattop beam / J.A. Hoffnagle, C.M. Jefferson // *Applied Optics*. – 2000. – Vol. 39(30). – P. 5488-5499. DOI: 10.1364/AO.39.005488.
- [4] Zhang, S. Single-element laser beam shaper for uniform flat-top profiles / S. Zhang, G. Neil, M. Shinn // *Optics Express*. – 2003. – Vol. 11(16). – P. 1942-1948. DOI: 10.1364/OE.11.001942.
- [5] Ma, H. Improvement of Galilean refractive beam shaping system for accurately generating near diffraction-limited flattop beam with arbitrary beam size / H. Ma, Z. Liu, P. Jiang, X. Xu, S. Du // *Optics Express*. – 2011. – Vol. 19(14). – P. 13105-13117. DOI: 10.1364/OE.19.013105.
- [6] Duerr, F. Refractive laser beam shaping by means of a functional differential equation based design approach / F. Duerr, H. Thienpont // *Optics Express*. – 2014. – Vol. 22(7). – P. 8001-8011. DOI: 10.1364/OE.22.008001.
- [7] Hui, X. Realization of uniform and collimated light distribution in a single freeform-Fresnel double surface LED lens / X. Hui, J. Liu, Y. Wan, H. Lin // *Applied Optics*. – 2017. – Vol. 56(15). – P. 4561-4565. DOI: 10.1364/AO.56.004561.
- [8] Poleshchuk, A.G. Aspherical wavefront shaping with combined computer generated holograms / A.G. Poleshchuk, R.K. Nasyrov // *Optical Engineering*. – 2013. – Vol. 52(9). – P. 91709. DOI: 10.1117/1.OE.52.9.091709.
- [9] Wyant, J.C. Using computer-generated holograms to test aspheric wavefronts / J.C. Wyant, V.P. Bennett // *Applied Optics*. – 1972. – Vol. 11(12). – P. 2833-2839. DOI: 10.1364/AO.11.002833.
- [10] Chen, S. Reconfigurable optical null based on counter-rotating Zernike plates for test of aspheres / S. Chen, C. Zhao, Y. Dai, S. Li // *Optics Express*. – 2014. – Vol. 22(2). – P. 1381-1386. DOI: 10.1364/OE.22.001381.
- [11] Tsai, C.Y. Refractive collimation beam shaper design and sensitivity analysis using a free-form profile construction method / C.Y. Tsai // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2017. – Vol. 34(7). – P. 1236-1245. DOI: 10.1364/JOSAA.34.001236.
- [12] Досколович, Л.Л. Расчёт осесимметричного оптического элемента для формирования заданных распределения освещённости и волнового фронта / Л.Л. Досколович, К.В. Андреева, Д.А. Быков // *Компьютерная оптика*. – 2018. – Т. 42, № 5. – С. 772-778. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-5-772-778.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 18-19-00326.

## Design of refractive optical elements for generating prescribed illuminance distribution and wavefront

K.V. Andreeva<sup>1,2</sup>, E.S. Andreev<sup>1,2</sup>, D.A. Bykov<sup>1,2</sup>, L.L. Doskolovich<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

<sup>2</sup>Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

**Abstract.** Design of an axisymmetric refracting optical element to transform an incident beam into an output beam with the prescribed illuminance distribution and prescribed wavefront is considered. The wavefront of the output beam is represented by the eikonal function defined in some plane behind the optical element. As examples, we consider the design of two optical elements to transform a spherical beam from a point Lambert light source into a beam with the uniform illuminance and plane.