

МЕТОД РАСЧЁТА TIR-ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СВЕТОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ

К.В. Андреева, С.В. Кравченко, М.А. Моисеев

Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия,
Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия

Представлен новый метод расчёта оптических элементов, работающих по принципу полного внутреннего отражения, для создания световых распределений произвольной формы. Метод основан на представлении рассчитываемых поверхностей набором специальных сегментов, формирующих световое распределение в наборе точек, с дальнейшей их аппроксимацией бикубическим сплайном. В качестве примера рассчитан оптический элемент, формирующий равномерно освещённую квадратную область с угловым размером 17° . Световая эффективность оптического элемента составила 91,8 %, а среднеквадратичное отклонение сформированного распределения освещённости от заданного – 5,2 %.

Ключевые слова: TIR-оптика, поверхность свободной формы, распределение освещённости.

Применение светодиодов в современных светотехнических устройствах подразумевает использование формирующей (вторичной) оптики – преломляющих или отражающих оптических элементов, трансформирующих световой поток от источника в заданное световое распределение. Задача расчёта таких элементов является крайне сложной и заключается в нахождении формы отражающих или преломляющих поверхностей из условия создания требуемого распределения освещённости или диаграммы направленности. Даже в случае приближения точечного источника света и одной формирующей поверхности данная задача сводится к решению нелинейного дифференциального уравнения в частных производных типа Монжа-Ампера [1]. Аналитические решения данного уравнения известны только для случаев с радиальной или цилиндрической симметрией. Однако не смотря на сложность данной задачи, на сегодняшний день известно множество работ, посвящённых расчёту оптических элементов с одной или несколькими преломляющими поверхностями [2-10].

Традиционные оптические элементы с одной или двумя последовательно расположенными преломляющими поверхностями, обеспечивают хорошие рабочие характеристики при создании световых распределений с угловыми размерами более 50° [2-5]. При формировании узких световых пучков (менее 50°), необходимость в которых возникает в задачах промышленного, архитектурного автомобильного, прожекторного и т.д. освещения, наиболее эффективным решением является применение TIR-оптических элементов – оптических элементов, работающих по принципу полного внутреннего отражения (англ. TIR – Total Internal Reflection – полное внутреннее отражение).

В настоящий момент известно множество работ, посвящённых расчёту TIR-оптических элементов [6-10]. В работах [6,7] рассмотрены различные подходы к решению осесимметричных задач. В работе [8] предложен дизайн вторичной оптики, обеспечивающей цветное смешение света при использовании мультиспектральных светодиодов с несколькими длинами волн, однако данный оптический элемент не

предназначен для создания распределения заданной формы. В статье [9] рассмотрено решение частной задачи расчёта элемента для автомобильной фары дальнего света. Таким образом, ни в одной из известных автору работ не рассмотрено метода решения проблемы формирования распределения освещённости/интенсивности произвольной асимметричной формы с помощью TIR-оптических элементов. В данной работе предложен общий подход к решению данной задачи.

Рассмотрим конструкцию рассчитываемого оптического элемента, представленную на рис. 1.

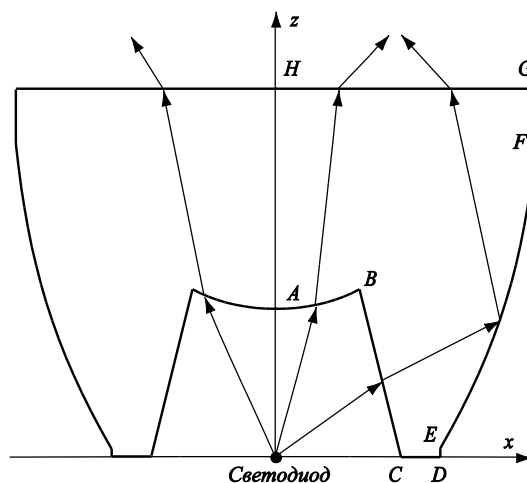


Рис.1. Конструкция TIR-оптического элемента

Внутренняя поверхность ABC оптического элемента состоит из двух частей: преломляющая поверхность AB , формирующая заданное световое распределение, и коническая поверхность BC , перенаправляющая лучи от источника на боковую поверхность EF . Поверхность EF является поверхностью, работающей по принципу полного внутреннего отражения, и аналогично поверхности AB формирует заданное световое распределение. Верхняя поверхность оптического элемента является плоской, через неё все преломлённые и отражённые лучи выводятся из оптического элемента. Таким образом, необходимо рассчитать две поверхности – AB и EF .

Расчёт поверхностей оптического элемента выполняется последовательно: сначала рассчитывается поверхность AB , после этого строится коническая поверхность BC с заданным углом наклона, далее определяется вторая искомая поверхность EF .

Расчёт формы каждой поверхности состоит из двух этапов – получения кусочно-гладкого решения из условия формирования дискретного светового распределения, аппроксимирующего непрерывную диаграмму направленности, и последующего сглаживания полученного решения сплайном. Под кусочно-гладким решением понимается набор базовых поверхностей (далее примитивов или сегментов), количество которых равно числу точек дискретного формируемого распределения. Каждый примитив поверхности предназначен для коллимации падающего на него светового пучка в требуемом направлении.

Форма сегмента преломляющей поверхности AB определяется с помощью выражения:

$$r_{AB}(\varphi, \psi) = r_0 \frac{1-n}{1-n(\mathbf{s}_0(\varphi, \psi), \mathbf{p})}, \quad (1)$$

где n – показатель преломления оптического элемента, \mathbf{s}_0 – единичный вектор луча, исходящего из источника света, \mathbf{p} – вектор требуемого направления светового потока внутри оптического элемента, r_0 – длина радиус-вектора вдоль заданного направления \mathbf{p} до точки поверхности.

Выражение, определяющее форму примитива поверхности EF , представлено ниже:

$$l = \frac{r_{BC,0} + nl_0(1 - (\mathbf{p}, \mathbf{s}_{1,0})) - r_{BC}(1 - n(\mathbf{p}, \mathbf{s}_0))}{n(1 - (\mathbf{p}, \mathbf{s}_1))}, \quad (2)$$

где $r_{BC,0} = r_{BC} \left(0, \frac{\pi}{2}\right)$, $\mathbf{s}_{1,0} = \mathbf{s}_1 \left(0, \frac{\pi}{2}\right)$, $\mathbf{s}_1(\varphi, \psi)$ – направление луча после преломления на поверхности BC .

Размер примитива и, следовательно, количество светового потока, попадающего на сегмент, полностью определяется одним параметром – r_0 в случае поверхности AB и l_0 в случае поверхности EF . Регулируя их значение, можно увеличивать или уменьшать величину светового потока, которая распространится в требуемом направлении. Подбор параметров r_0 и l_0 осуществляется методом, предложенным в работе [10]. Значения параметров полностью определяют вид кусочно-гладких поверхностей. Непрерывные поверхности получают путём аппроксимации набора сегментов сплайном.

Таким образом, задача расчёта двух поверхностей сводится к определению $2N$ параметров: r_0 и l_0 , с последующей аппроксимацией примитивов сплайнами, где N – количество точек требуемого распределения.

Разработанный метод был реализован на языке программирования Matlab. С помощью него был рассчитан TIR-оптический элемент, формирующий равномерное распределение освещённости в квадратной области с угловым размером 17° (рис. 2).

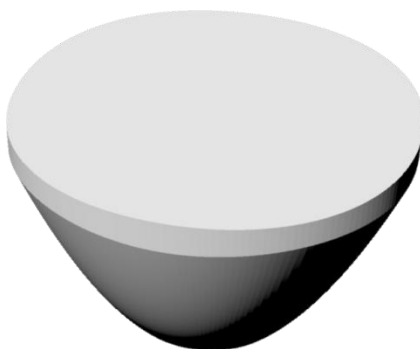


Рис.2. Оптический элемент, формирующий равномерное распределение освещённости в квадратной области

Результат моделирования рассчитанного элемента в коммерческом программном обеспечении TracePro представлен на рис. 3. Световая эффективность данного решения составила 91,8 % при среднеквадратичной ошибке менее 5,2 %.

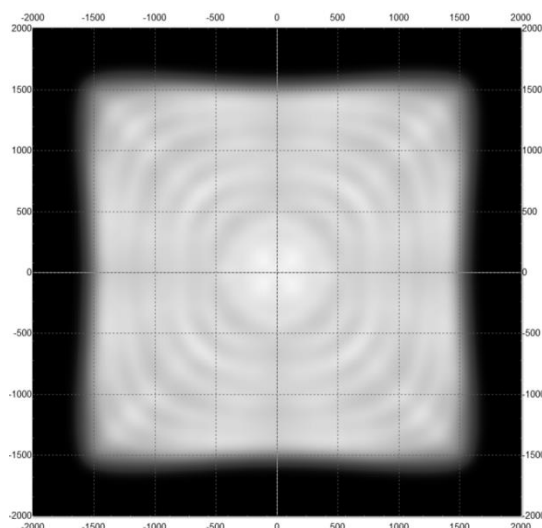


Рис.3. Распределение освещённости, формируемое оптическим элементом, представленным на рис. 2

Таким образом, новый метод позволяет рассчитывать TIR-оптические элементы с двумя поверхностями свободной формы – внешней боковой, работающей по принципу полного внутреннего отражения, и внутренней преломляющей поверхностью. Оптический элемент, рассчитанный предложенным методом, обладает высокой световой эффективностью (91,8 %) и с высокой точностью (СКО 5,2 %) формирует распределение освещённости в квадратной области с угловым размером 17° , что подтверждает отличную работоспособность метода.

Благодарности

Работа выполнена за счёт гранта Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 14-07-00339 А.

Литература

1. Guan, P. On a Monge-Ampere equation arising in optics / P. Guan, X.-J. Wang // *Journal of Differential Geometry*. – 1998. – Vol. 48(2). – P. 205-223. – ISSN 0022-040X.
2. 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.
3. Chen H.-C. Rectangular illumination using a secondary optics with cylindrical lens for LED street light/ H.-C. Chen, J.-Y. Lin, H.-Y. Chiu // *Opt. Express*. – 2013. – Vol. 21, N 3. – P. 3201-3212.
4. Michaelis, D. Cartesian oval representation of freeform optics in illumination systems/ D. Michaelis, P. Schreiber, and A. Bräuer // *Optics Letters*. – Vol. 36(6), – P. 918–920 (2011).
5. 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.
6. Moiseev M.A. Fast and robust technique for design of axisymmetric TIR optics in case of an extended light source/ Mikhail A. Moiseev, Leonid L. Doskolovich, Kseniya V. Borisova, Egor V. Byzov // *Journal of Modern Optics*. – 2013. – Vol. 60, N 14. – P. 1100-1106.
7. Моисеев М.А. Оптимизационный метод для расчёта TIR оптических элементов, включающий процедуру быстрой трассировки лучей / М.А. Моисеев, К.В. Борисова, Е.В. Бызов, Л.Л. Досколович // *Компьютерная оптика*. – 2013. – Т. 37, №1. – С. 51-58.
8. Grabovičkić, D. TIR RXI collimator / D. Grabovičkić, P. Benítez, J. C. Miñano // *Optics Express*. – 2012. – Vol. 20(S1). – P. A51-A61.

9. Бызов Е.В. Метод расчёта вторичной оптики светодиодов для автомобильных фар дальнего света / Е.В. Бызов, М.А. Моисеев, Л.Л. Досколович // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, №4. – С. 743-748.
10. 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.