

МЕТОД РАСЧЁТА ВТОРИЧНОЙ ОПТИКИ СВЕТОДИОДОВ ДЛЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ФАР ДАЛЬНОГО СВЕТА

Бызов Е.В., Моисеев М.А., Досколович Л.Л.

Институт систем обработки изображений РАН,

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет) (СГАУ)

Аннотация

В данной работе представлен аналитический метод расчёта оптического элемента, формирующего диаграмму направленности, удовлетворяющую требованиям для автомобильных фар дальнего света. Оптический элемент состоит из коллиматора, работающего по принципу полного внутреннего отражения, и микролинзового массива, расфокусирующего световой пучок в горизонтальном направлении и создающего требуемое распределение интенсивности. В качестве примера был рассчитан и промоделирован с различными светодиодами оптический элемент, позволяющий формировать пучок дальнего света классов В, С, D. Результаты моделирования показывают, что при размерах оптического элемента 33×23 мм достаточно 2 модулей для формирования пучка света классов В, С и 3 модулей – для пучка класса D.

Ключевые слова: неизображающая оптика, геометрический расчёт оптики, оптический элемент, расчёт преломляющей поверхности, дальний свет, светодиод, поверхность свободной формы, TIR-оптика.

Введение

В последние годы в автомобильной промышленности чётко обозначился тренд перехода на светодиодные источники освещения. Светодиодными светотехническими устройствами комплектуется, как правило, премиальный сегмент автомобилей, что связано, в частности, с высокой сложностью разработки вторичной оптики светодиодов, отвечающей за перенаправление светового потока и формирование необходимого светового распределения.

Вторичная оптика светодиодов представляет собой оптические элементы с преломляющими или отражающими поверхностями, устанавливаемые непосредственно над источником излучения. Задача расчёта такого оптического элемента из условия формирования заданного светового распределения является крайне сложной. Даже в случае точечного источника и единственной рабочей преломляющей поверхности данная задача сводится к решению нелинейного дифференциального уравнения второго порядка в частных производных эллиптического типа (Монже–Ампера) [1–4]. Аналитические решения данного уравнения известны только для некоторых тривиальных случаев с осевой или цилиндрической симметрией [5–7]. Для создания сложных несимметричных свето-

вых распределений используются поверхности свободной формы, требующие использования при расчёте итерационных процедур [8–11].

В данной работе представлен аналитический метод расчёта оптического элемента, формирующего диаграмму направленности для автомобильных фар дальнего света. Оптический элемент состоит из коллиматора, работающего по принципу полного внутреннего отражения, и микролинзового массива, расфокусирующего световой пучок в горизонтальном направлении и создающего требуемое распределение интенсивности.

1. Расчёт оптического элемента

Согласно требованиям ООН ЕЭК R113, проверка распределения интенсивности, формируемого фарой дальнего света, проводится путём измерения силы света в ряде направлений и последующего сравнения полученных значений с эталонными. В табл. 1 приведены контрольные направления и диапазоны допустимых значений интенсивности. Угловые координаты в табл. 1 указаны в соответствии с установкой гониометра, при которой горизонтальная ось («подъёма») фиксируется по уровню грунта, а вторая, подвижная, ось («поворота») перпендикулярна зафиксированной горизонтальной оси.

Таблица 1. Контрольные направления и диапазоны допустимых значений интенсивности

Номер испытательной точки	Угловые координаты испытательных точек	Требуемая сила света, кд					
		Класс В		Класс С		Класс D	
		МИН.	МАКС.	МИН.	МАКС.	МИН.	МАКС.
1	H–V	16 000	---	20 000	---	30 000	---
2	H–2,5°R и 2,5°L	9 000	---	10 000	---	20 000	---
3	H–5°R и 5°L	2 500	---	3 500	---	5 000	---
4	H–9°R и 9°L	---	---	2 000	---	3 400	---
5	H–12°R и 12°L	---	---	600	---	1 000	---
6	2°U–V	---	---	1 000	---	1 700	---
	Минимальная пиковая интенсивность	20 000	---	25 000	---	40 000	---
	Максимальная пиковая интенсивность	---	215 000	---	215 000	---	215 000

Анализ требований, представленных в табл. 1, показывает, что удовлетворительным считается распределение интенсивности, близкое к сколлимированному и немного вытянутое в горизонтальном направлении. Распределение интенсивности такого рода может быть сформировано оптическим элементом, состоящим из коллиматора и микрорельефа, корректирующего плоский пучок (рис. 1). В данной работе для эффективного коллимирования светового пучка предлагается использовать оптический элемент, работающий по принципу полного внутреннего отражения (так называемую TIR-оптику).

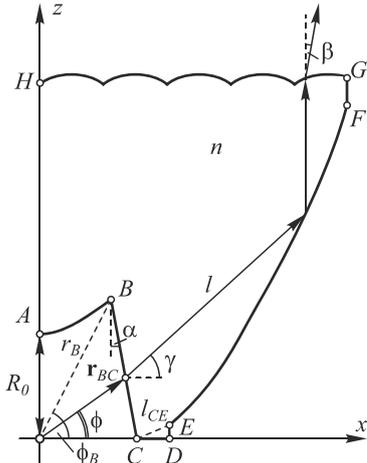


Рис. 1. Профиль оптического элемента, состоящего из коллиматора и микрорельефа, корректирующего плоский пучок

Рассмотрим подробнее конструкцию элемента, приведённого на рис. 1. Часть AB внутренней преломляющей поверхности работает по принципу преломления, её профиль является гиперболой и определяется следующим выражением [6]:

$$r_{AB}(\psi) = R_0 \frac{n-1}{n \cos \psi - 1}, \tag{1}$$

где n – показатель преломления оптического элемента, а R_0 – расстояние от источника до внутренней поверхности вдоль оси Oz .

Поверхность BC является частью конуса, профиль которого описывается в полярных координатах как

$$r_{BC}(\varphi) = r_B \frac{\cos(\varphi_B - \alpha)}{\cos(\varphi - \alpha)}, \tag{2}$$

где r_B – расстояние от источника до точки B, φ_B – угол между отрезком OB и осью Ox , α – угол наклона конической поверхности, а φ – угол между радиус-вектором $r_{BC}(\varphi)$ и осью Ox . Преломляясь на этой поверхности, лучи отклоняются от оси Oz , что позволяет уменьшить размер оптического элемента. После преломления на поверхности BC лучи испытывают полное внутреннее отражение на части профиля EF, которая также рассчитывается аналитически [12] с помощью следующего выражения:

$$l(\varphi) = \frac{r_C - r_{BC}(1 - n \sin \varphi) + l_{CE}n(1 - \sin \gamma_0)}{n(1 - \sin \gamma)}, \tag{3}$$

где $l(\varphi)$ – расстояние, которое проходит преломлённый на поверхности BC луч до поверхности EF, $r_C = r_{BC}(0)$ – расстояние от источника до точки C, l_{CE} – расстояние между точками C и E, определяющее размер части профиля EF, $\gamma = \alpha + \arcsin \frac{\varphi - \alpha}{n}$ – угол между преломлённым лучом и осью Ox , $\gamma_0 = \gamma(0)$ – угловая координата луча, вышедшего из источника в горизонтальном направлении, после преломления.

Выражения (1)–(3) в явном виде описывают профиль линзы, работающей по принципу полного внутреннего отражения и формирующей плоский световой пучок при точечном источнике излучения. Отметим, что данный световой пучок имеет неравномерное распределение освещённости вдоль оси Ox . Для небольшой расфокусировки такого пучка вдоль оси Ox можно использовать массив микролинз с профилем $z(x)$ (рис. 1), экструдированным в направлении оси Oy .

Профиль микролинзы может быть рассчитан интегрированием следующего дифференциального уравнения, разрешённого относительно производной [13]:

$$\frac{dz}{dx} = \frac{\sin \beta(x)}{n - \cos \beta(x)}, \tag{4}$$

где $\beta(x)$ – так называемая функция лучевого соответствия, определяющая связь между координатой x падающего на преломляющую поверхность луча и угловой координатой β преломлённого луча (рис. 1). Данная функция в общем случае рассчитывается путём интегрирования следующего дифференциального уравнения, также разрешённого относительно производной [13]:

$$\frac{d\beta}{dx} = \frac{E(x)}{I(\beta)}, \tag{5}$$

где $E(x)$ – распределение освещённости перед микролинзой, а $I(\beta)$ – требуемое распределение интенсивности. Так как ширина микролинзы предполагается достаточно малой, распределение освещённости $E(x)$ на входе микролинзы можно считать постоянным. В этом случае при формировании светового пучка с равномерным распределением интенсивности решением уравнения (5) является линейная функция

$$\beta(x) = kx, \tag{6}$$

где коэффициент k определяется как отношение углового размера формируемой диаграммы направленности к ширине микролинзы. Подставив выражение (6) в дифференциальное уравнение (4) и проинтегрировав его, получим аналитическое выражение для функции профиля микролинзы $z(x)$:

$$z(x) = \frac{1}{k} \ln \left| \frac{n - \cos kx}{n - 1} \right| + z_0, \tag{7}$$

где z_0 – высота профиля при $x = 0$.

Выражение (7) в явном виде представляет профиль микролинзового массива, формирующего изотропное по оси Ox распределение интенсивности с заданным угловым размером при падающем световом пучке с равномерным распределением освещённости.

2. Результаты моделирования

С помощью выражений (1)–(3), (7) был рассчитан оптический элемент, трёхмерный вид которого приведён на рис. 2. Его высота составляет 23 мм, диаметр – 33 мм. При расчёте использовались следующие параметры: $R_0 = 5$ мм, $n = 1,493$ (соответствует показателю преломления полиметилметакрилата), $\varphi_B = 63^\circ$, $\alpha = 2^\circ$, $l_{CE} = 1$ мм. Параметр R_0 был выбран достаточно большим, так как размер оптического элемента напрямую влияет на степень коллимирования светового пучка. Микролинзовый массив рассчитан из условия расфокусирования коллимированного светового пучка в линейную диаграмму направленности с угловым размером 10° .

На рис. 3–6 в порядке возрастания размера излучающего тела приведены результаты моделирования рассчитанного оптического элемента со светодиодами Cree® XP-C, XP-E, XP-G2, XM-L2. Все результаты получены при стандартном световом потоке в 100 лм от источника.

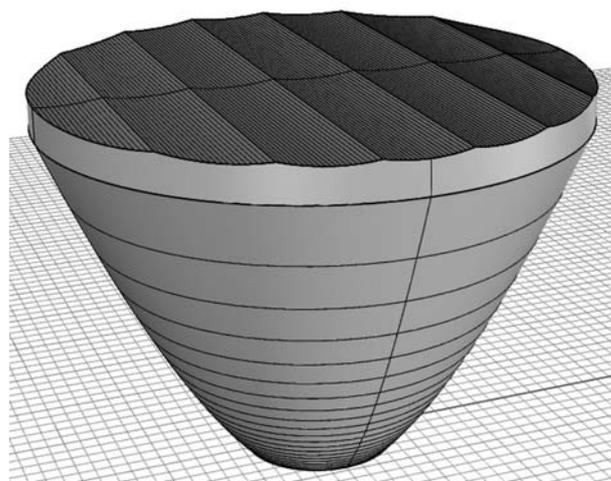


Рис. 2. Изображение трёхмерной модели оптического элемента, позволяющего формировать пучок дальнего света автомобиля

Необходимо отметить, что при небольшом размере чипа светодиода формируемая диаграмма направленности наиболее близка к линейной, а значения силы света в контрольных точках максимальны.

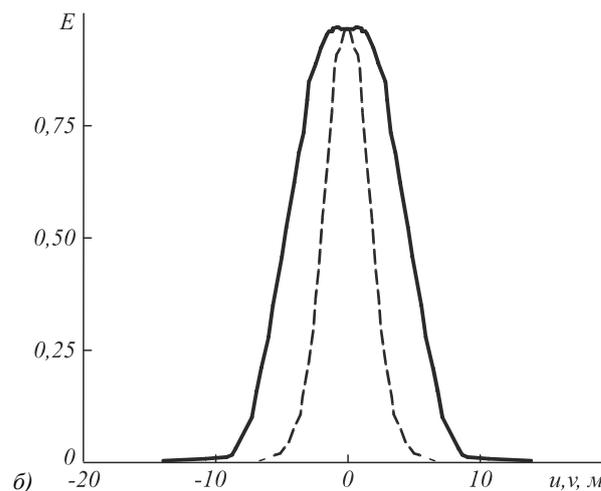
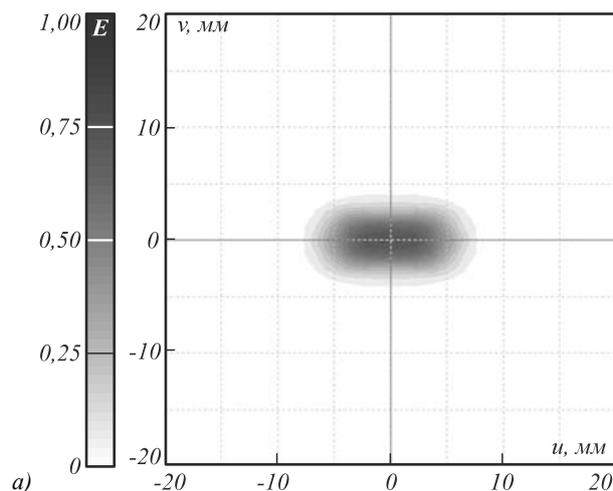


Рис. 3. Результаты моделирования оптического элемента, изображённого на рис. 2, со светодиодом Cree® XP-C: а) полутоновое распределение освещённости, б) профили распределения освещённости

Увеличение размера чипа ведёт к «размытию» диаграммы направленности и уменьшению значений силы света в контрольных точках. При этом модели светодиодов с большим размером чипа позволяют извлечь больший световой поток, таким образом позволяя компенсировать невысокие значения силы света для данного приложения. Например, максимальный световой поток светодиода Cree® XP-C составляет всего лишь 138 лм, в то время как Cree® XM-L2 позволяет извлечь до 1052 лм. Тем не менее выбор между компактным чипом с высокой эффективностью формирования линейной диаграммы направленности и большим чипом с высоким световым потоком остаётся неочевидным.

В табл. 2 приведено сравнение силы света в контрольных точках для различных светодиодов, а также количества светодиодных модулей, необходимых для удовлетворения требованиям ООН ЕЭК R113 в классах В, С, D.

Стоит отметить, что световой пучок, вышедший из светодиодного модуля, попадает на плоскопараллельное стекло фары автомобиля, которое может быть расположено под углом к горизонту.

При расчёте количества модулей, используемых в фаре автомобиля, необходимо учесть, что это стекло может поглощать порядка 9–10 % светового потока.

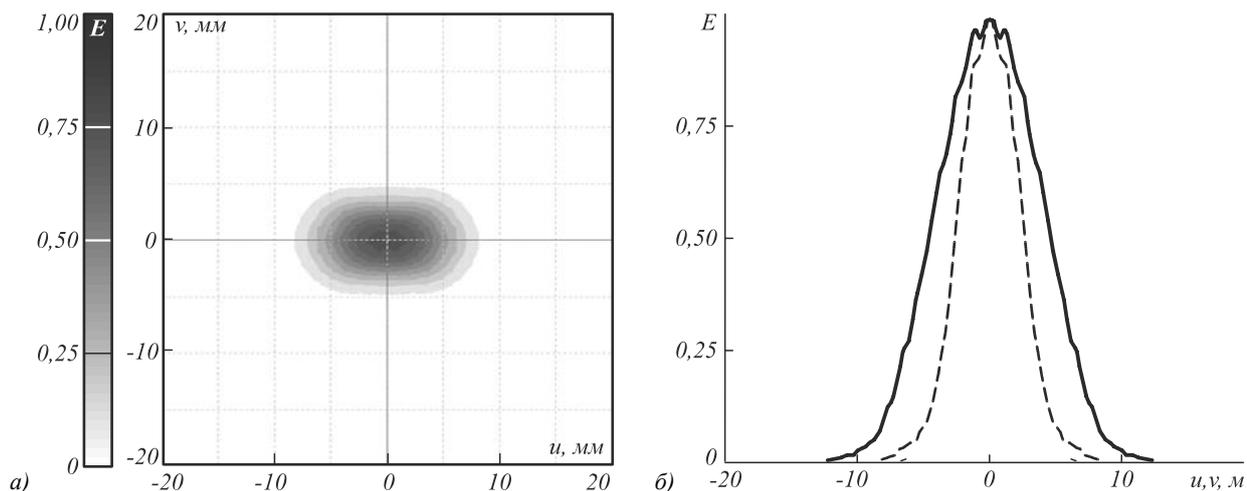


Рис. 4. Результаты моделирования оптического элемента, изображённого на рис. 2, со светодиодом Cree® XP-E: а) полутоновое распределение освещённости, б) профили распределения освещённости

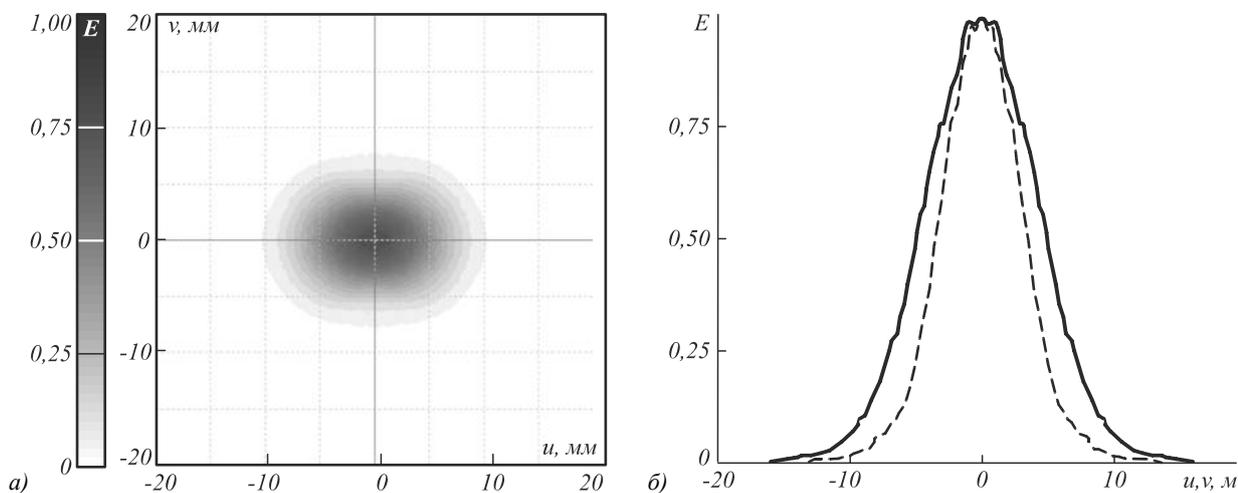


Рис. 5. Результаты моделирования оптического элемента, изображённого на рис. 2, со светодиодом Cree® XP-G2: а) полутоновое распределение освещённости, б) профили распределения освещённости

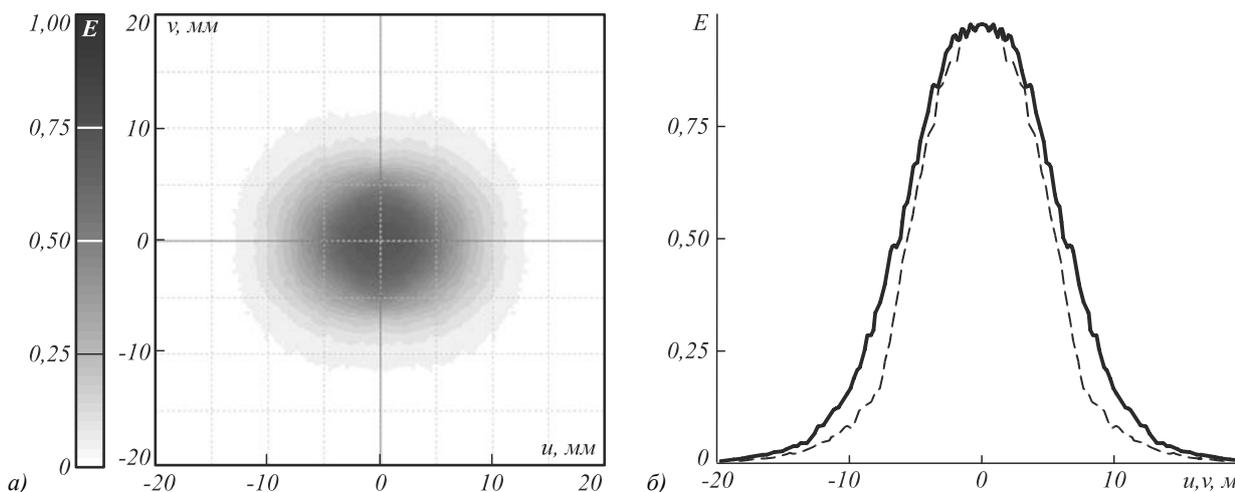


Рис. 6. Результаты моделирования оптического элемента, изображённого на рис. 2, со светодиодом Cree® XM-L2: а) полутоновое распределение освещённости, б) профили распределения освещённости

Таблица 2. Значения силы света в контрольных точках диаграммы направленности для различных светодиодов

Светодиод	Сила света в контрольных точках при 100 лм с чипа, кд / максимальная сила света в контрольной точке, кд							Минимальное количество светодиодных модулей		
	1	2	3	4	5	6	I_{\max}	Класс B	Класс C	Класс D
XP-C	6 500 / 8 970	6 000 / 8 280	3 050 / 4 209	50 / 69	0 / 0	4 000 / 5 520	6 500 / 8 970	3	-	-
XP-E	4 900 / 14 259	4 100 / 11 931	2 050 / 5 965	200 / 582	50 / 145	3 800 / 11 058	4 900 / 14 259	2	5	7
XP-G2	3 350 / 16 348	2 800 / 13 664	1 750 / 8 540	400 / 1 952	70 / 341	2 750 / 13 420	3 350 / 16 348	2	2	3
XM-L2	1 800 / 18 936	1 700 / 17 884	1 200 / 12 624	450 / 4 734	150 / 1 578	1 650 / 17 358	1 800 / 18 936	2	2	3

Результаты сравнения в табл. 2 показывают, что при проектировании фары дальнего света класса B наиболее приемлемым является использование светодиода Cree® XP-E, в этом случае для формирования требуемой диаграммы направленности достаточно двух светодиодных модулей. При создании фар более высокого класса оптимальным является использование светодиодов XP-G2 или XM-L2 ввиду необходимости широкой засветки в области 12° на горизонтальной оси.

Заключение

В данной работе приведены полученные аналитические выражения для расчёта оптических элементов светодиодов, формирующих диаграммы направленности, удовлетворяющие требованиям для автомобильных фар дальнего света (ООН ЕЭК R113). В качестве примера был рассчитан и промоделирован с различными светодиодами оптический элемент, позволяющий формировать пучок дальнего света классов B, C, D. Результаты моделирования показывают, что при размерах оптического элемента 33×23 мм достаточно 2 модулей для формирования пучка классов B, C и 3 модулей – для пучка класса D.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 13-07-97001-р_поволжье_a, 14-07-31135-мол_a, 14-07-00339-a.

Литература

1. Guan, P. On a Monge-Ampere equation arising in geometric optics / P. Guan, X.-J. Wang // Journal of Differential Geometry. – 1998. – Vol. 48(2). – P. 205-223.
2. Oliker, V.I. Geometric and variational methods in optical design of reflecting surfaces with prescribed irradiance properties / V.I. Oliker // SPIE Proceedings. – 2005. – Vol. 5942. – P. 594207.
3. Parkyn, W.A. Illumination lenses designed by extrinsic differential geometry / W.A. Parkyn // SPIE Proceedings. – 1998. – Vol. 3482. – P. 389-396.
4. Kirkilionis, M. Trends in Nonlinear Analysis / M. Kirkilionis, S. Kromker, R. Rannacher, F. Tomi. – Berlin: Springer, 2003. – P. 193-224.
5. Kusch, O. Computer-aided optical design of illumination and irradiating devices / O. Kusch – Moscow: “ASLAN” Publishing House, 1993. – 192 p.
6. Досколович, Л.Л. Расчёт радиально-симметричных преломляющих поверхностей с учётом френелевских потерь / Л.Л. Досколович, М.А. Моисеев // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32, № 2. – С. 201-203.
7. Досколович, Л.Л. Расчёт преломляющих оптических элементов для формирования диаграммы направленности в виде прямоугольника / Л.Л. Досколович, М.А. Моисеев // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76, № 7. – С. 70-76.
8. Zhenrong, Zh. Freeform surface lens for LED uniform illumination / Zh. Zhenrong, H. Xiang, L. Xu // Applied Optics. – 2009. – Vol. 48(35). – P. 6627-6634.
9. 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.
10. Vazquez-Molini, D. High-efficiency light-emitting diode collimator / D. Vazquez-Molini, M. Gonzalez-Montez, A. Alvarez, E. Bernabeu // Optical Engineering. – 2010. – Vol. 49(12). – P. 123001.
11. Parkyn, B. Free-form illumination lens designed by a pseudo-rectangular lawnmower algorithm / B. Parkyn, D. Pelka // SPIE Proceedings. – 2006. – Vol. 6338. – P. 633808.
12. Elmer, W.B. Optical design of reflectors / W.B. Elmer // Applied Optics. – 1978. – Vol. 17(7). – P. 977-979.
13. Moiseev, M.A. Design of TIR optics generating the prescribed irradiance distribution in the circle region / M.A. Moiseev, L.L. Doskolovich // Journal of the Optical Society of America A. – 2012. – Vol. 29(9). – P. 1758-1763.

References

1. Guan, P. On a Monge-Ampere equation arising in geometric optics / P. Guan, X.-J. Wang // Journal of Differential Geometry. – 1998. – Vol. 48(2). – P. 205-223.
2. Oliker, V.I. Geometric and variational methods in optical design of reflecting surfaces with prescribed irradiance properties / V.I. Oliker // SPIE Proceedings. – 2005. – Vol. 5942. – P. 594207.
3. Parkyn, W.A. Illumination lenses designed by extrinsic differential geometry / W.A. Parkyn // SPIE Proceedings. – 1998. – Vol. 3482. – P. 389-396.
4. Kirkilionis, M. Trends in Nonlinear Analysis / M. Kirkilionis, S. Kromker, R. Rannacher, F. Tomi. – Berlin: Springer, 2003. – P. 193-224.
5. Kusch, O. Computer-aided optical design of illumination and irradiating devices / O. Kusch - Moscow: “ASLAN” Publishing House, 1993. – 192 p.
6. Doskolovich, L.L. Design of radially-symmetrical refractive surface taking into account Fresnel loss / L.L. Doskolovich, M.A. Moiseev // Computer Optics. – 2008. – Vol. 32(2). – P. 201-203. – (In Russian).
7. Doskolovich, L.L. Calculations for refracting optical elements for forming directional patterns in the form of a rectangle / L.L. Doskolovich, M.A. Moiseev // Journal of Optical Technology. – 2009. – Vol. 76(7). – P. 70-76. – (In Russian).

8. **Zhenrong, Zh.** Freeform surface lens for LED uniform illumination / Zh. Zhenrong, H. Xiang, L. Xu // *Applied Optics*. – 2009. – Vol. 48(35). – P. 6627-6634.
9. **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.
10. **Vazquez-Molini, D.** High-efficiency light-emitting diode collimator / D. Vazquez-Molini, M. Gonzalez-Montez, A. Alvarez, E. Bernabeu // *Optical Engineering*. – 2010. – Vol. 49(12). – P. 123001.
11. **Parkyn, B.** Free-form illumination lens designed by a pseudo-rectangular lawnmower algorithm / B. Parkyn, D. Pelka // *SPIE Proceedings*. – 2006. – Vol. 6338. – P. 633808.
12. **Elmer, W.B.** Optical design of reflectors / W.B. Elmer // *Applied Optics*. – 1978. – Vol. 17(7). – P. 977-979.
13. **Moiseev, M.A.** Design of TIR optics generating the prescribed irradiance distribution in the circle region / M.A. Moiseev, L.L. Doskolovich // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2012. – Vol. 29(9). – P. 1758-1763.

METHOD FOR COMPUTATION OF LED SECONDARY OPTICS FOR AUTOMOTIVE HEADLIGHT

E.V. Byzov, M.A. Moiseev, L.L. Doskolovich
Image Processing Systems Institute, Russian Academy of Science,
Samara State Aerospace University

Abstract

We propose a new analytical method for the calculation of an optical element that forms the intensity distribution in compliance with the requirements for automotive-beam headlamps. The optical element consists of a collimator, operating on the principle of total internal reflection (TIR), and a microlens array, creating the required intensity distribution. As an example, an optical element producing the headlight beam of classes B, C, D is presented. With an optical element of size 33×23 mm, it is enough to use two modules to generate a headlight beam of classes B, C and three modules for a headlight beam of class D.

Key words: geometric optical design, nonimaging optics, light-emitting diodes, optical element, refractive surface design, headlight, free-form surface, TIR-optics.

Сведения об авторах



Бызов Егор Владимирович, 1988 года рождения. В 2014 году с отличием окончил магистратуру Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (СГАУ) по направлению «Прикладные математика и физика». В списке научных работ Е.В. Бызова 9 публикаций и 1 авторское свидетельство.

E-mail: xameak@bigmir.net.

Egor Vladimirovich Byzov (b. 1988) graduated with honors (2014) from Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov (SSAU), majoring in Applied Mathematics and Physics. He is co-author of 9 scientific papers and 1 patent.



Моисеев Михаил Александрович, 1986 года рождения, в 2008 году с отличием окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (СГАУ) по специальности 010600 «Прикладные математика и физика». Кандидат физико-математических наук (2011 год), работает научным сотрудником в лаборатории дифракционной оптики Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН). Является членом международного научного общества *SPIE*. М.А. Моисеев – специалист в области решения обратных задач геометрической оптики. В списке научных работ М.А. Моисеева 23 статьи и 7 авторских свидетельств.

Homepage: <http://www.ipsi.smr.ru/staff/MoiseevM.htm>.

E-mail: mikhail@smr.ru.

Mikhail Alexandrovich Moiseev (b. 1986) graduated with honors (2008) from Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov (SSAU), majoring in Applied Mathematics and Physics. He received his Philosophy Degree in Physics and Mathematics (2011) from Samara State Aerospace University. He is a researcher in Diffraction Optics laboratory of the Image Processing Systems Institute of the RAS (IPSI RAS). He is a *SPIE*-member. He is co-author of 23 scientific papers and 7 inventions and patents. His current research interests include nonimaging optics.

Сведения об авторе Досколович Леонид Леонидович – см. стр. 597 этого номера.

Поступила в редакцию 17 сентября 2014 г.