

РАСЧЁТ ВТОРИЧНОЙ ОПТИКИ СВЕТОДИОДНОГО ПРОЖЕКТОРА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАДАННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСВЕЩЁННОСТИ

© 2010 А.А. Белоусов¹, М.А. Моисеев²

¹Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)
²Институт систем обработки изображений РАН

Представлен метод расчёта преломляющей поверхности, формирующей заданное распределение освещённости с большими угловыми размерами при протяжённом источнике излучения. Метод основан на градиентной оптимизации преломляющей поверхности, представленной в виде бикубического сплайна в сферических координатах. Рассчитана вторичная оптика светодиодного прожектора для формирования равномерной освещённости в прямоугольной области. Энергетическая эффективность рассчитанных элементов составляет более 75 %, а неравномерность формируемого распределения освещённости – менее 10 %.

Расчёт оптических элементов, вторичная оптика, равномерная освещённость, светоизлучающий диод, градиентный метод.

Введение

Использование светоизлучающих диодов (СИД) становится всё более масштабным. Их применяют в автомобильной светотехнике [1-3], системах подсветки жидкокристаллических мониторов [4, 5], системах освещения и т.д. Это связано с увеличением их светового потока и уменьшением стоимости. СИД компактны, устойчивы к вибрациям и механическим ударам, имеют большой срок службы и большую эффективность. К 2025 году использование СИД в США позволит сократить потребление электроэнергии на освещение на 29% и сэкономить 125 миллиардов долларов. В то же время развитие светотехнических устройств на основе СИД тормозит отсутствие эффективных методов расчёта, позволяющих проектировать оптические элементы для формирования заданных распределений освещённости с высокой световой эффективностью.

При проектировании оптических головок светодиодов задача состоит в расчёте внешней преломляющей поверхности головки светодиода из условия формирования заданного распределения освещённости в некоторой плоскости. При точеч-

ном (компактном) источнике излучения указанная задача сводится к решению нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных типа уравнения Монже-Ампера [6,7]. Решение данных уравнений является сложной задачей. Аналитические решения известны только для частных случаев поверхностей с радиальной или цилиндрической симметрией [8-15]. Для расчёта сложных нерадиально-симметричных оптических поверхностей (в англоязычной литературе – free-form) используются оптимизационные итерационные процедуры, требующие больших временных и вычислительных затрат [16-24]. Работоспособность итерационных процедур [16-24] является недостаточной. Задача расчёта преломляющей (отражающей) оптической поверхности для формирования постоянной освещённости в прямоугольной области с большим угловым размером по-прежнему является актуальной.

В работах [17, 18] рассмотрен метод расчёта преломляющих поверхностей, основанный на численном решении уравнения Монже-Ампера. Метод позволяет создавать сложные распределения осве-

щённости, например, в виде букв. В расчётном примере в [18] буквы формируются на равномерно засвеченном фоне. Это связано с требованием непрерывности заданного распределения освещённости. Освещённость фона составляет порядка 30% от освещённости в зоне букв, что существенно снижает световую эффективность. Примеры расчёта преломляющих поверхностей для формирования практически важных прямоугольной и эллиптической областей в [17, 18] не рассмотрены.

В работах [21–23] представлены градиентные методы расчёта преломляющей поверхности для формирования заданного распределения освещённости при точечном и протяжённом источниках излучения. Методы основаны на оптимизации функции эйконала, заданной в прилегающей к оптическому элементу плоскости, и последующем восстановлении преломляющей поверхности по распределению эйконала. Приведённые в работах [21–23] примеры показывают хорошую работоспособность метода для источников, излучающих в небольшие телесные углы (порядка стерadian). Как правило, реальный источник излучает в полусферу (светодиоды) или сферу (лампы накаливания). Для эффективного использования излучения источника необходимо перераспределять весь его световой поток в освещаемую область.

Наиболее развитый метод расчёта преломляющей поверхности представлен в работах [24]. Расчёт преломляющей поверхности в [24] основан на решении нелинейной системы уравнений. Метод требует задания функции лучевого соответствия между угловыми координатами исходящих из источника лучей и координатами лучей, попадающих в область регистрации. В работе [24] не предложен общий способ задания функции лучевого соответствия, что ограничивает область применения метода.

Тем не менее, метод [24] позволяет формировать заданное распределение освещённости в прямоугольнике и правильном восьмиугольнике с высокой эффективностью и равномерностью.

В работе [25] представлен градиентный метод, позволяющий рассчитывать преломляющие поверхности, формирующие заданное распределение освещённости при точечном источнике излучения. Метод [25] учитывает френелевские потери на отражение, что позволяет формировать равномерно освещённые области с угловым размером 150° и более. Ограничением метода [25] является требование малости размеров источника излучения. В работе [26] представлена модификация метода [25] на случай протяжённого источника излучения. Расчётные примеры показывают, что метод позволяет формировать равномерно освещённые области в виде эллипса и прямоугольника с угловыми размерами 145° при протяжённом источнике $1\text{ мм} \times 1\text{ мм}$. Отношение размера освещённой области к расстоянию до неё составляет порядка 6,5, что более чем в два раза превосходит результаты, опубликованные в работах [18, 21–24].

При помощи разработанного метода [26] в настоящей работе был проведён расчёт вторичной оптики светодиодного прожектора. Данное светотехническое устройство позволяет равномерно освещать заданные области большой площади при малом размере самого прожектора.

Постановка задачи

Геометрия задачи представлена на рис. 1. Источник излучения должен равномерно освещать прямоугольную область с размерами $30\text{ м} \times 14\text{ м}$, находящуюся на расстоянии 12 м от источника под углом 15° к нормали поверхности источника. Источник смещён относительно центра требуемой области освещения на $3,5\text{ м}$ по оси Y . Коэффициент преломления материала оптического элемента – 1,49.

В качестве источника излучения предлагается использовать светодиодный прожектор. Светодиодный планарный прожектор состоит из набора СИД, установленных в одной плоскости. Каждый СИД снабжён преломляющим оптическим элементом (вторичной оптикой), который

формирует требуемое распределение освещённости.

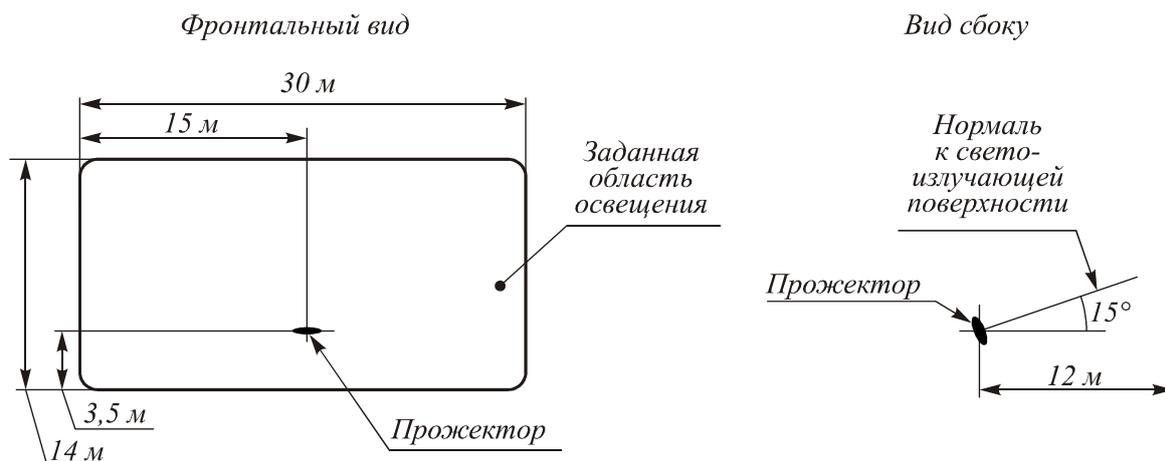


Рис. 1. Схема расположения светодиодного прожектора и освещаемой области

Необходимо рассчитать оптический преломляющий элемент из условия формирования требуемого распределения освещённости в заданной области от протяжённого источника излучения. Форма этого элемента будет одинакова для всех СИД планарного прожектора.

Результаты расчёта

Оптический элемент был получен при помощи метода расчёта преломляющей поверхности для формирования заданного распределения освещённости [26]. Данный метод позволяет рассчитать оптический элемент, формирующий заданное распределение освещённости с большими угловыми размерами при протяжённом источнике излучения. Метод использует непараксиальное приближение и учитывает френелевские потери при преломлении на границе оптического элемента.

Метод основан на градиентной оптимизации преломляющей поверхности, представленной в виде бикубического сплайна в сферических координатах. Его параметрами являются значения радиус-вектора и его производных в узлах сплайновой сетки [27]. При расчёте использовалась сетка (i, j) : $i = i / 4, i = 0, 1, \dots, 8$, $j = j / 7, j = 0, 1, \dots, 7$. Она имеет 64 узла, что соответствует 256 параметрам оптимизации (64 значения радиус-вектора, 128 значений его первых производных и 64

значения смешанной производной). В случае формирования симметричных распределений освещённости в прямоугольной или эллиптической области достаточно определить функцию $r(\theta, \phi)$ только в первом квадранте. Это позволяет более чем в четыре раза снизить количество параметров оптимизации.

Для градиентной оптимизации использовался поиск по методу Бройдена-Флетчера-Голдфарба-Шанно [28]. В качестве начального приближения для оптимизации был взят оптический элемент, формирующий равномерное распределение освещённости в круглой области [14]. Сплайновая сетка (определённая в первом квадранте) имела 24 узла, что соответствовало 61 параметру оптимизации (с учётом свойств симметрии). Оптимизация заняла порядка 2 часов на компьютере с процессором Intel® Core™2 Quad 9400.

На рис. 2 представлен рассчитанный оптический элемент.

Данная оптическая поверхность была рассчитана для СИД Cree XLamp XP-G White [29] (рис. 3). Световой поток данного СИД составляет 92 лм/Вт, размер излучающего тела 1,5 мм × 1,5 мм. На рис. 4 представлена диаграмма направленности излучения такого источника. Расположение рассчитанного преломляющего элемента и СИД показано на рис. 5.

На рис. 6 изображено распределение освещённости, формируемое расчи-

таным оптическим элементом на вы- ходной плоскости.

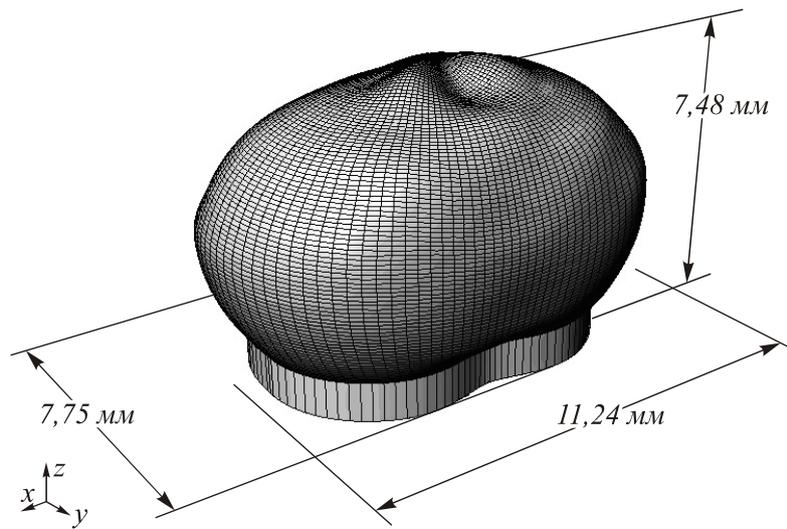


Рис. 2. Геометрия рассчитанного оптического элемента

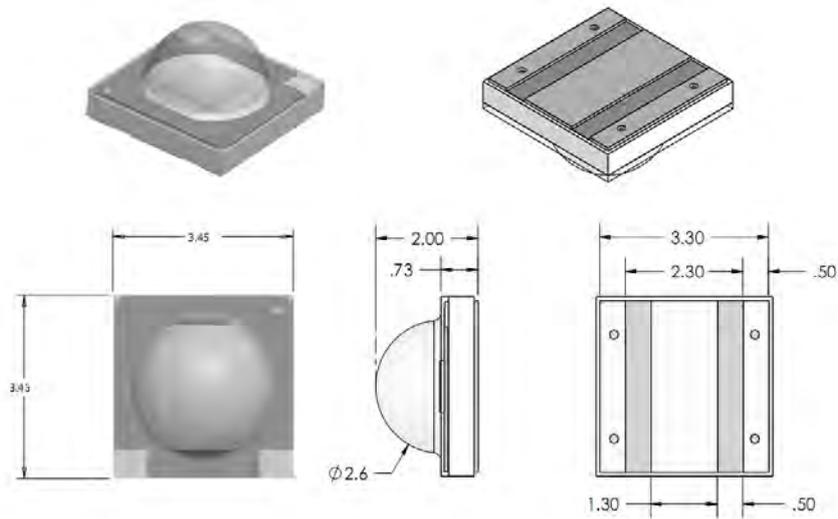


Рис. 3. СИД Cree XLamp XP-G White (размеры приведены в мм)

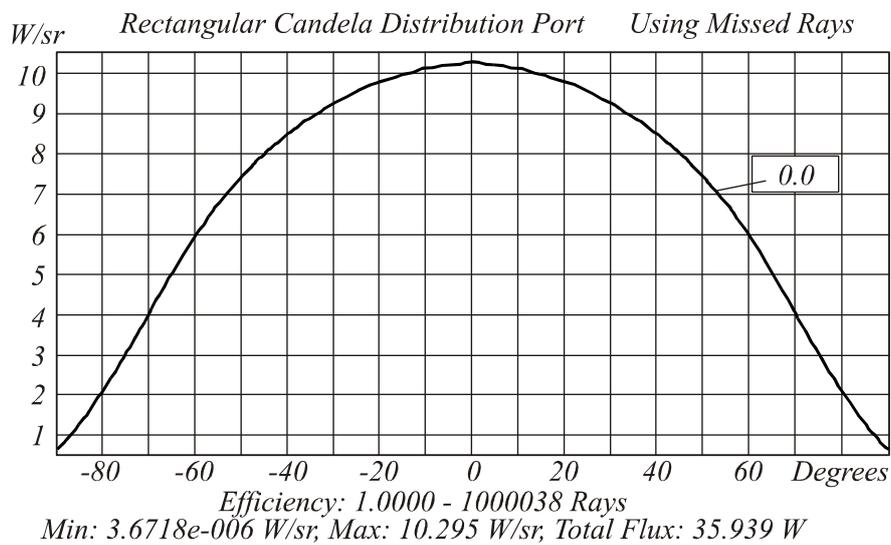


Рис. 4. Диаграмма направленности излучения СИД

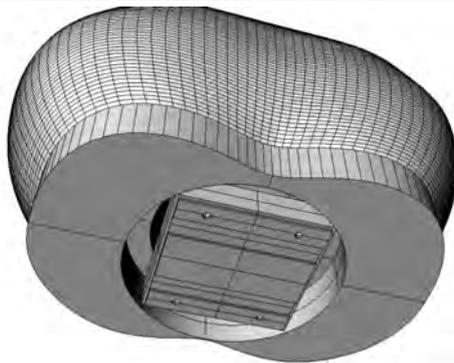


Рис. 5. Расположение СИД относительно рассчитанного оптического элемента

Энергетическая эффективность элемента составляет 75,4 %, а неравномерность освещённости – менее 9,9 %. Распределение освещённости на рис. 6 получено с помощью специализированного программного обеспечения TracePro® [30]. Моделирование проводилось для одного миллиона лучей. Необходимо отметить, что TracePro® не позволяет решать рассматриваемые задачи расчёта оптических элементов и используется в работе только для моделирования формируемого распределения освещённости.

При производстве светотехнических устройств крайне важна точность изготовления оптических элементов. Элемент, изготовленный с более высокой точностью, может формировать освещённость не лучше, чем элемент с более низкой, но стоит производство такого элемента будет гораздо дороже. На рис. 7 представлены зависимости изменения параметров полученного распределения освещённости от изменения положения источника излучения относительно рассчитанного элемента по осям X и Y.

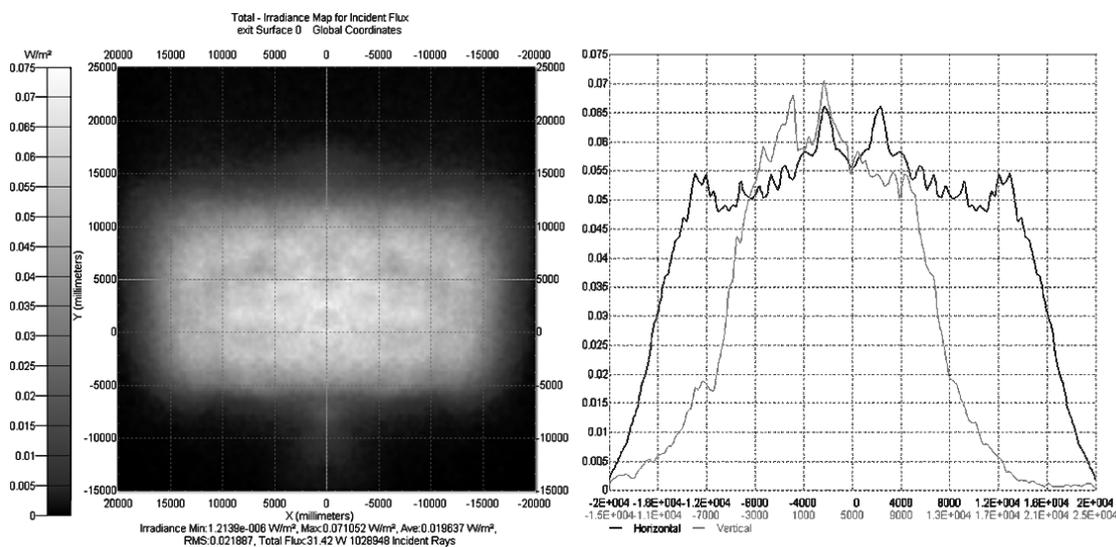


Рис. 6. Распределение освещённости, формируемое рассчитанным оптическим элементом

Точность позиционирования источника излучения относительно оптического элемента оказывает сильное влияние на формируемую освещённость в плоскости наблюдения, в соответствии с рис. 7. Ошибка СКО растёт квадратично с ростом отклонения. Снижение световой эффективности – линейно. Отклонение по оси Y сильнее влияет на качество формирования освещённости.

На рис. 8 представлены результаты моделирования для рассчитанной поверхности и изменённой поверхности. Изменённая поверхность была получена добавлением к каждой точке исходной поверхности некоторой случайной величины, распределённой по гауссовому закону. Абсолютное значение добавляемой случайной величины не превышало 0,2 мм. Моделирование проводилось при 100 000 лучей.

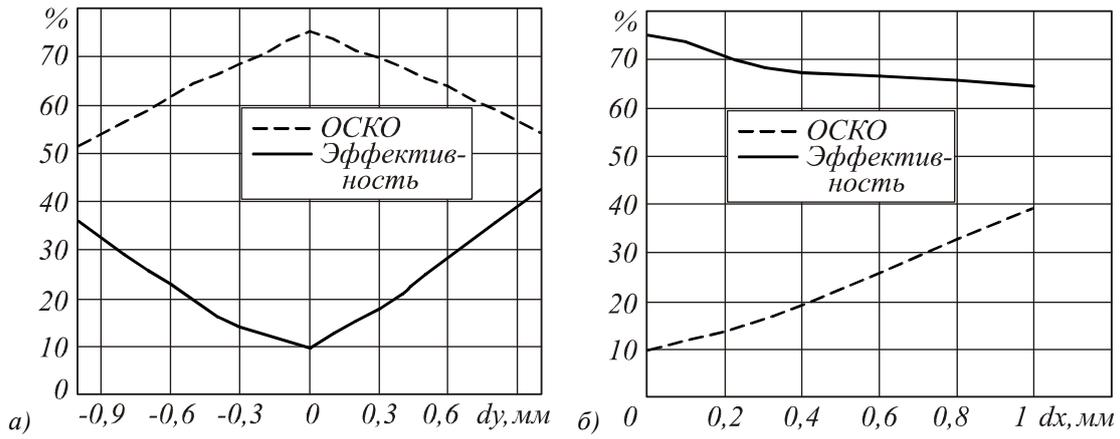


Рис. 7. Зависимость качества формирования распределения освещённости от смещения источника излучения по оси X (а), по оси Y (б)

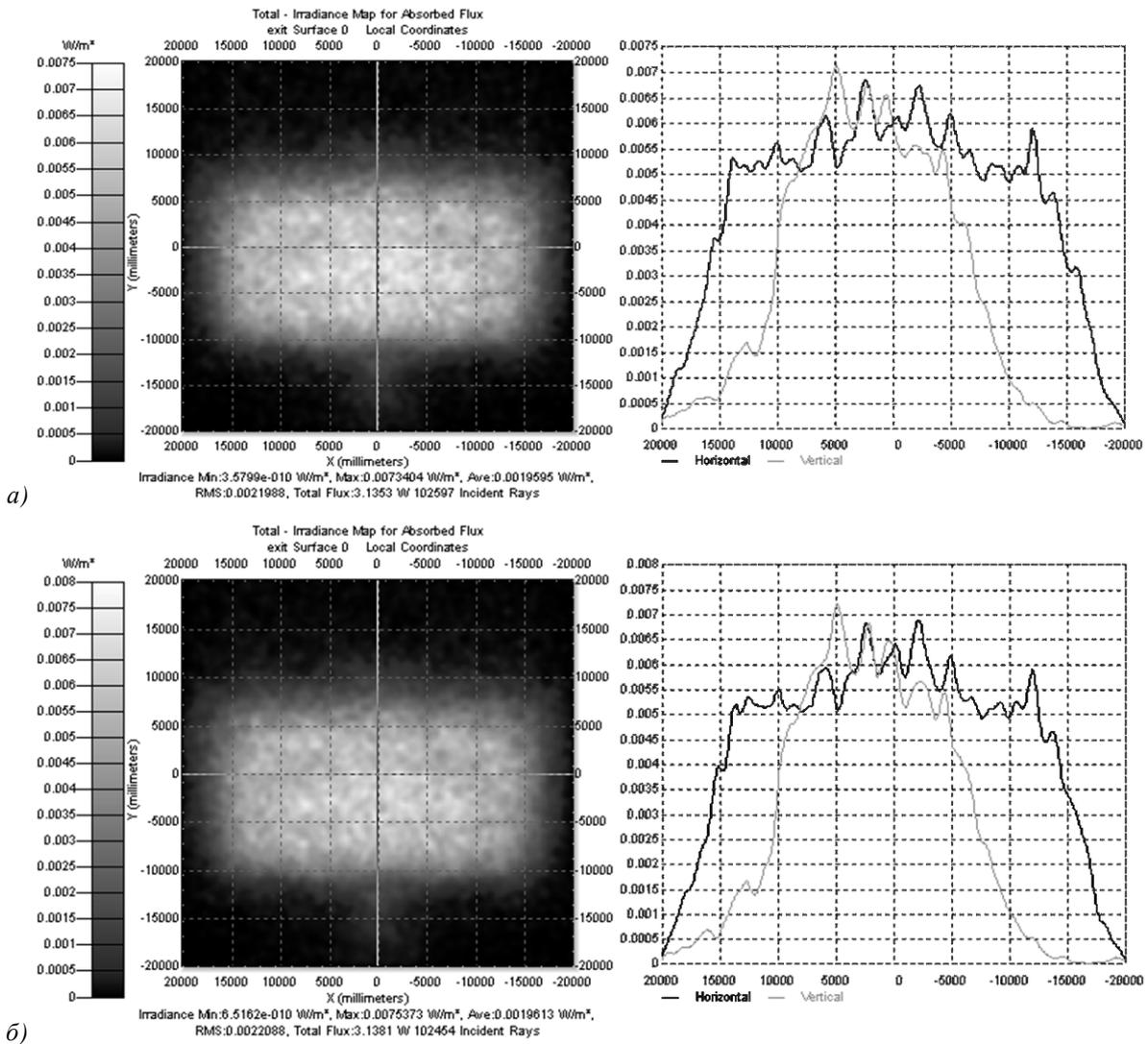


Рис. 8. Распределение освещённости: от рассчитанной поверхности (а), от поверхности с возмущениями (б)

Из рис. 8 видно, что возмущения, внесённые в рассчитанную поверхность, практически не повлияли на качество формируемого распределения освещённости.

Таким образом, при производстве рассчитанного оптического элемента требования по допуску на изготовление и классу чистоты элемента могут быть снижены. На качество полученного распределения освещённости в большей степени влияет точность взаимного расположения светодиода и его вторичной оптики.

Заключение

Метод расчёта преломляющих поверхностей, представленный в работе [26], использован для расчёта вторичной оптики светодиодного прожектора, формирующего равномерное распределение освещённости в прямоугольной области 30 м × 14 м. В качестве источника излучения был использован светоизлучающий

диод Cree XLamp XP-G White. Энергетическая эффективность рассчитанного оптического элемента превосходит 75 %, относительное среднеквадратичное отклонение формируемого распределения освещённости от заданного – менее 10%. Проведено исследование влияния погрешностей при изготовлении устройства на формируемое распределение освещённости.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ 09-07-12147-офи_м), грантов Президента РФ поддержки ведущих научных школ НШ-3086.2008.9 и НШ-7414.2010.9.

Библиографический список

1. **Muschaweck, J.** Tailored LED lowbeam headlamps [Текст] / J. Muschaweck // *Laser + Photonik*. – 2004. – V. 02/2004. – P. 26-28.

2. **Benitez, P.** Etendue Preserving Mixing and Projection Optics for High Brightness LEDs Applied to Automotive Headlamps [Текст] / P. Benitez, J. Chaves, A. Cvetkovic, O. Dross, J.C. Minano, R. Mohedano // *Proc. SPIE*. – 2006. – Vol. 6342(2). – P. 63420R.

3. **Benitez, P.** Etendue-preserving mixing and projection optics for high-luminance LEDs, applied to automotive headlamps [Текст] / P. Benitez, J. Chaves, A. Cvetkovic, O. Dross, J.C. Minano, R. Mohedano // *Optics Express*. – 2006. – Vol. 14(26). – P. 13014–13020.

4. **Sung-II, Ch.** Microlens array diffruser for a light-emitting diode backlight system [Текст] / L. Baik-Kyu, H.Sh. Dong, K. Jin-Jong, Y. Jun-Bo, K. Hongki, Ch. Sung-II // *Optics Letters*. – 2006. – Vol. 31(20). – P. 3016-3018.

5. **Jui-Wen, P.** Homogenized LED-illumination using microlens arrays for a pocket-sized projector [Текст] / W. Chih-Ming, L. Hisao-Chin, Ch. Jeng-Yang, P. Jui-Wen, S. Wen-Shin // *Optics Express*. – 2007. – Vol. 15(17). – P. 10483–10491.

6. **Pengfei, P.** On a Monge-Ampere equation arising in geometric optics [Текст] / G. Pengfei, W. Xu-Jia // *J. Differential Geom.* – 1998. – Vol. 48(2). – P. 205–223.

7. **Oliker, V.** Determining the intensities produced by reflected and refracted wave fronts in geometrical optics [Текст] / E. Newman, V.I. Oliker // *J. Opt. Soc. Am. A*. – 1995. – Vol. 12(4). – P. 784–793.

8. **Elmer, W.B.** Optical design of reflectors. Part 2. [Текст] / W.B. Elmer // *Applied Optics*. – 1978. – Vol. 17(7). – P. 977–979.

9. **Elmer, W.B.** The Optical Design of Reflectors [Текст] / W.B. Elmer – N.-Y.: Wiley, 1980. – 290 pp.

10. **Kusch, O.** Computer-aided optical design of illumination and irradiating devices [Текст] / O. Kusch – М.: "ASLAN" Publishing House, 1993. – 192 pp.

11. **Hicks, R.A.** Designing a mirror to realize a given projection [Текст] / R.A. Hicks // *J. Opt. Soc. Am. A*. – 2005. – Vol. 22(2). – P. 323-330.

12. **Досколович, Л.Л.** Расчёт формы поверхности зеркал для формирования изображения в виде линии [Текст] / Л.Л. Досколович, С.И. Харитонов // *Оптический журнал*. – 2005. – Т. 4. – С. 34-37.

13. **Doskolovich, L.L.** Designing a mirror to form a lineshaped directivity diagram [Текст] / L.L. Doskolovich, N.L. Ка-

zansky, S. Bernard // *J. Mod. Opt.* – 2007. – Vol. 54(4). – P. 589-597.

14. **Моисеев, М.А.** Расчёт радиально-симметричных преломляющих поверхностей с учётом френелевских потерь [Текст] / Л.Л. Досколович, М.А. Моисеев // *Компьютерная оптика.* – 2008. – Т. 32, № 2. – С. 201-203.

15. **Моисеев, М.А.** Расчёт преломляющего оптического элемента, формирующего диаграмму направленности в виде отрезка [Текст] / Л.Л. Досколович, М.А. Моисеев // *Компьютерная оптика.* – 2008. – Т. 32, № 4. – С. 366-369.

16. **Bortz, J.** Optimal design of a nonimaging projection lens for use with an LED source and a rectangular target [Текст] / J. Bortz, N. Shatz, D. Pitou // *Proc. SPIE.* – 2000. – Vol. 4092. – P. 130–138.

17. **Ries, H.** Tailoring freeform lenses for illumination [Текст] / J. Muschaweck, H. Ries // *Proc. SPIE.* – 2001. – Vol. 4442. – P. 43-50.

18. **Ries, H.** Tailored freeform optical surfaces [Текст] / J. Muschaweck, H. Ries // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 2002. – Vol. 19(3). – P. 590-595.

19. **Jacobson, B.A.** Lens for uniform LED illumination: an example of automated optimization using Monte Carlo ray-tracing of an LED source [Текст] / B.A. Jacobson, R.D. Gendelbach // *Proc. SPIE.* – 2001. – Vol. 4446. – P. 130-138.

20. **Parkyn, B.** Free-form illumination lens designed by a pseudo-rectangular lawnmower algorithm [Текст] / B. Parkyn, D. Pelka // *Proc. SPIE.* – 2006. – Vol. 6338. – P. 633808.

21. **Белоусов, А.А.** Градиентный метод решения задачи фокусировки в двумерную область при протяжённом источнике [Текст] / А.А. Белоусов, Л.Л. Досколович // *Компьютерная оптика.* – 2007. – Т. 31, № 3. – С. 20-26.

22. **Белоусов, А.А.** Градиентный метод расчёта эйконала для фокусировки в заданную область [Текст] / А.А. Белоусов, Л.Л. Досколович, С.И. Харитонов // *Автоматрия.* – 2007. – № 1. – С. 98-106.

23. **Белоусов, А.А.** Градиентный метод расчёта оптических элементов для формирования заданной освещённости на криволинейной поверхности [Текст] / А.А. Белоусов, Л.Л. Досколович, С.И. Харитонов // *Оптический журнал.* – 2008. – Т. 75, № 3. – С. 30-35.

24. **Yi, D.** Freeform LED lens for uniform illumination [Текст] / G. Pei-fu, L. Xu, D. Yi, Zh. Zhen-rong // *Optics Express.* – 2008. – Vol. 16(17). – P. 12958-12966.

25. **Моисеев, М.А.** Градиентный расчёт преломляющей сплайн-поверхности из условия формирования заданного распределения освещённости [Текст] / Л.Л. Досколович, М.А. Моисеев // *Компьютерная оптика.* – 2009. – Т. 33, № 1. – С. 37-42.

26. **Моисеев, М.А.** Расчёт преломляющего оптического элемента для формирования заданного распределения освещённости при протяжённом источнике излучения [Текст] / М.А. Моисеев, Л.Л. Досколович // *Компьютерная оптика.* – 2009. – Т. 34, № 2. – С. 194-202.

27. **Boor, C.De.** A Practical Guide to Splines [Текст] / Carl De Boor – N.Y.: Springer, 2001. – 346 pp.

28. **Gill, Ph.E.** Practical Optimization [Текст] / Ph.E. Gill, W. Murray, M.H. Wright – N.Y.: Springer, 1981. – 401 pp.

29. XLamp® XP-G LED [Электронный ресурс]. - http://www.cree.com/products/xlamp_xpg.asp.

30. Lambda Research Corporation [Электронный ресурс]. - http://lambdaresearch.com/software_products/tracepro/.

References

1. **Muschaweck, J.** Tailored LED lowbeam headlamps [Text] / J. Muschaweck // *Laser+Photonik.* – 2004. – V. 2004/02. – P. 26-28.

2. **Benitez, P.** Etendue Preserving Mixing and Projection Optics for High Brightness LEDs Applied to Automotive Headlamps [Text] / P. Benitez, J. Chaves, A. Cvetkovic, O. Dross, J.C. Minano,

- R. Mohedano // Proc. SPIE. – 2006. – Vol. 6342(2). – P. 63420R.
3. **Benitez, P.** Etendue-preserving mixing and projection optics for high-luminance LEDs, applied to automotive headlamps [Text] / P. Benitez, J. Chaves, A. Cvetkovic, O. Dross, J.C. Minano, R. Mohedano // Optics Express. – 2006. – Vol. 14(26). – P. 13014-13020.
4. **Sung-II, Ch.** Microlens array diffuser for a light-emitting diode backlight system [Text] / L. Baik-Kyu, H.Sh. Dong, K. Jin-Jong, Y. Jun-Bo, K. Hongki, Ch. Sung-II // Optics Letters. – 2006. – Vol. 31(20). – P. 3016-3018.
5. **Jui-Wen, P.** Homogenized LED-illumination using microlens arrays for a pocket-sized projector [Text] / W. Chih-Ming, L. Hisao-Chin, Ch. Jeng-Yang, P. Jui-Wen, S. Wen-Shin // Optics Express. – 2007. – Vol. 15(17). – P. 10483-10491.
6. **Pengfei, P.** On a Monge-Ampere equation arising in geometric optics [Text] / G. Pengfei, W. Xu-Jia // J. Differential Geom. – 1998. – Vol. 48(2). – P. 205-223.
7. **Oliker, V.** Determining the intensities produced by reflected and refracted wave fronts in geometrical optics [Text] / E. Newman, V.I. Oliker // J. Opt. Soc. Am. A. – 1995. – Vol. 12(4). – P. 784-793.
8. **Elmer, W.B.** Optical design of reflectors. Part 2. [Text] / W.B. Elmer // Applied Optics. – 1978. – Vol. 17(7). – P. 977-979.
9. **Elmer, W.B.** The Optical Design of Reflectors [Text] / W.B. Elmer – N.-Y.: Wiley, 1980. – 290 pp.
10. **Kusch, O.** Computer-aided optical design of illumination and irradiating devices [Text] / O. Kusch – M.: "ASLAN" Publishing House, 1993. – 192 pp.
11. **Hicks, R.A.** Designing a mirror to realize a given projection [Text] / R.A. Hicks // J. Opt. Soc. Am. A. – 2005. – Vol. 22(2). – P. 323-330.
12. **Doskolovich, L.L.** Calculating the surface shape of mirrors for shaping an image in the form of a line [Text] / L.L. Doskolovich, S.I. Kharitonov // J. Opt. Tech., 2005. – Vol. 72(4). – P. 318-321. – [in Russian].
13. **Doskolovich, L.L.** Designing a mirror to form a lineshaped directivity diagram [Text] / L.L. Doskolovich, N.L. Kazansky, S. Bernard // J. Mod. Opt. – 2007. – Vol. 54(4). – P. 589-597. – [in Russian].
14. **Doskolovich, L.L.** Designing radially symmetric refractive surfaces with regard for Fresnel losses [Text] / L.L. Doskolovich, M.A. Moiseev // Computer Optics. – 2008. – Vol. 32, No. 1. – P. 201-203. – [in Russian].
15. **Doskolovich, L.L.** Calculations for refracting optical elements for forming directional patterns in the form of a rectangle [Text] / L.L. Doskolovich, M.A. Moiseev // J. Opt. Tech. – 2009. – Vol. 76(7). – P. 430-434. – [in Russian].
16. **Bortz, J.** Optimal design of a nonimaging projection lens for use with an LED source and a rectangular target [Text] / J. Bortz, N. Shatz, D. Pitou // Proc. SPIE. – 2000. – Vol. 4092. – P. 130-138.
17. **Ries, H.** Tailoring freeform lenses for illumination [Text] / J. Muschaweck, H. Ries // Proc. SPIE. – 2001. – Vol. 4442. – P. 43-50.
18. **Ries, H.** Tailored freeform optical surfaces [Text] / J. Muschaweck, H. Ries // J. Opt. Soc. Am. A. – 2002. – Vol. 19(3). – P. 590-595.
19. **Jacobson, B.A.** Lens for uniform LED illumination: an example of automated optimization using Monte Carlo ray-tracing of an LED source [Text] / B.A. Jacobson, R.D. Gendelbach // Proc. SPIE. – 2001. – Vol. 4446. – P. 130-138.
20. **Parkyn, B.** Free-form illumination lens designed by a pseudo-rectangular lawnmower algorithm [Text] / B. Parkyn, D. Pelka // Proc. SPIE. – 2006. – Vol. 6338. – P. 633808.
21. **Belousov, A.A.** A gradient method for solving problem of focusing light from extended source to the 2D region [Text] / A.A. Belousov, L.L. Doskolovich // Computer Optics. – 2007. – Vol. 31, No. 3. – P. 20-26. – [in Russian].

22. **Belousov, A.A.** A gradient method of eikonal calculating for focusing in the prescribed region [Text] / A.A. Belousov, L.L. Doskolovich, S.I. Kharitonov // *Avtometriya*. – 2007. – Vol. 1. – P. 98-106. – [in Russian].
23. **Belousov, A.A.** A gradient method of designing optical elements for forming a specified irradiance on a curved surface [Text] / A.A. Belousov, L.L. Doskolovich, S.I. Kharitonov // *J. Opt. Tech.* – 2008. – Vol. 75(3). – P. 161-165.
24. **Yi, D.** Freeform LED lens for uniform illumination [Text] / G. Pei-fu, L. Xu, D. Yi, Zh. Zhen-rong // *Optics Express*. – 2008. – Vol. 16(17). – P. 12958-12966.
25. **Doskolovich, L.L.** Gradient calculation of refracting B-spline surface generating prescribed irradiance distribution [Text] / L.L. Doskolovich, M.A. Moiseev // *Computer Optics*. – 2009. – Vol. 33, No. 1. – P. 37-42. – [in Russian].
26. **Doskolovich, L.L.** Design of refractive optical element producing required irradiance distribution for extended light source [Text] / L.L. Doskolovich, M.A. Moiseev // *Computer Optics*. – 2009. – Vol. 34, No. 2. – P. 192-202. – [in Russian].
27. **Boor, C.De.** A Practical Guide to Splines [Text] / Carl De Boor – N.Y.: Springer, 2001. – 346 pp.
28. **Gill, Ph.E.** Practical Optimization [Text] / Ph.E. Gill, W. Murray, M.H. Wright – N.Y.: Springer, 1981. – 401 pp.
29. XLamp® XP-G LED [Electronic Resource]. - http://www.cree.com/products/xlamp_xpg.asp.
30. Lambda Research Corporation [Electronic Resource]. - http://lambdares.com/software_products/tracepro/.

DESIGN OF LED SPOTLIGHT SECONDARY OPTICS PRODUCING REQUIRED IRRADIANCE DISTRIBUTION

© 2010 A.A. Belousov¹, M.A. Moiseev²

¹Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov
(National Research University)

²Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences

A method for design of refractive optical element producing the prescribed irradiance distribution with large angular dimensions from extended light source is presented. The method is based on the gradient optimization of the refractive surface represented as a bicubic spline in spherical coordinates. The secondary LED optic that produce uniform irradiance distribution in the rectangular region extended light source is computed. The energy efficiency of the optical elements is more than 75 %; the non-uniformity of the generated irradiance distribution is less than 10 %.

Optical elements design, secondary optics, uniform irradiance, light-emitting diode, gradient method.

Информация об авторах

Белоусов Александр Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры технической кибернетики. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: оптика, светотехника, методы оптимизации, математическое моделирование. E-mail: adark@narod.ru.

Моисеев Михаил Александрович, аспирант, стажёр-исследователь. Институт систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: оптика, светотехника, методы оптимизации. E-mail: mikhail@smr.ru.

Belousov Alexander Alexandrovich, candidate of physical and mathematics sciences, associate professor of technical cybernetics department. Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Area of research: optics, light engineering, optimization methods, mathematic modeling. E-mail: adark@narod.ru.

Moiseev Mikhail Alexandrovich, post-graduate student, probationer of Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences. Area of research: optics, light engineering, optimization methods. E-mail: mikhail@smr.ru.