

## РАСЧЁТ КОМПАКТНОЙ ОПТИКИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАДАНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ОСВЕЩЁННОСТИ СВЕТА

Асланов Э.Р.<sup>1</sup>, Досколович Л.Л.<sup>2,3</sup>, Моисеев М.А.<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Московский центр технологий LG TSM,

<sup>2</sup>Институт систем обработки изображений РАН,

<sup>3</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет им. Академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

### Аннотация

Предложена компактная оптическая система, состоящая из тонкого коллиматора и микролинзового массива, для равномерного освещения областей различной формы. Представлены аналитические формулы для расчёта микролинз массива. Результаты моделирования рассчитанных оптических элементов в пакете прикладных программ Zemax показывают высокую равномерность освещения областей квадратной, прямоугольной и линейной форм.

**Ключевые слова:** свободная поверхность, коллиматор, геометрическая оптика, светодиод, трассировка лучей.

### Введение

Задача расчёта преломляющего (отражающего) оптического элемента для формирования заданного распределения освещённости является актуальной при проектировании систем освещения различного назначения. С математической точки зрения данная задача является обратной задачей и состоит в расчёте формы поверхности (или поверхностей) оптического элемента из условия формирования заданного распределения освещённости в некоторой плоскости. Решение данной задачи (в случае одной поверхности) сводится к решению нелинейного дифференциального уравнения в частных производных типа уравнения Монже–Ампера [1, 2]. Аналитическое решение данного уравнения возможно только для тривиальных задач с цилиндрической или радиальной симметрией. В работах [3–13] рассмотрены различные численные и итерационные методы расчёта отражающих и преломляющих поверхностей свободной формы (free-form) для формирования заданных распределений освещённости.

При создании светодиодных устройств прожекторного типа требуется формирование заданного распределения освещённости в областях со сравнительно небольшим угловым размером ( $70^\circ$ – $80^\circ$  и меньше). Использование преломляющих оптических элементов, имеющих одну рабочую поверхность, не позволяет достигнуть высокой световой эффективности при освещении областей с таким угловым размером. Это связано с ограниченными возможностями рефракционной поверхности при повороте лучей на большие углы. Например, при показателе преломления материала элемента 1,5 максимальный угол поворота луча при преломлении на границе материал–воздух составляет около  $49^\circ$ . Светодиод излучает в телесный угол, соответствующий полусфере. Соответственно, использование оптического элемента с одной рабочей преломляющей поверхностью не позволит собрать излучаемый светодиодом световой поток в области с угловым размером менее  $80^\circ$ . Поэтому в светодиодных системах прожектор-

ного типа необходимо использовать оптические элементы с несколькими рабочими поверхностями.

Одни из способов эффективного освещения областей с малым угловым размером состоит в использовании стандартных светодиодных коллиматоров в комбинации с преломляющими оптическими элементами, имеющими поверхности свободной формы. Один из вариантов комбинации (рис. 1) был предложен в работах [14, 15]. В данном случае оптический элемент состоит из коллиматора 1 и массива оптических элементов 2 (рис. 1). Элементы массива рассчитываются из условия формирования заданной освещённости при освещающем пучке с плоским волновым фронтом. Для расчёта оптических элементов в общем случае используются численные и итерационные методы [3–15].

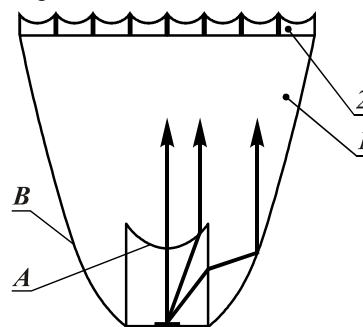


Рис. 1. Оптическая схема коллиматора с микролинзовым массивом

Коллиматор 1 был предложен в патентах компании Philips [16–18]. Принцип работы коллиматора является следующим. Часть A внутренней поверхности соответствует гиперболоиду вращения и обеспечивает коллимацию центральных лучей от источника. Лучи, преломлённые на боковой поверхности внутренней полости, испытывают полное внутреннее отражение (ПВО) на наружной параболлической поверхности B. За счёт использования ПВО эффективность коллиматора (доля излучённого светового потока, выходящая из коллиматора) составляет около 90%. Расходимость выходного пучка варьируется в пределах от  $10^\circ$  до  $30^\circ$  в зависимости от размера светодиода. Под расходимостью пучка

понимается полный угол, соответствующий уровню 0,5 спада интенсивности. Толщина такого коллиматора составляет около 20 мм при диаметре 30–40 мм.

Точность формирования заданного распределения освещённости с помощью комбинированного элемента (рис. 1) существенно зависит от расходимости пучка, формируемого коллиматором.

В работах [19, 20] авторами предложен компактный коллиматор, формирующий пучок со значительно меньшей расходимостью. В данной работе рассматриваются оптические элементы, соответствующие комбинации предложенного коллиматора и массива оптических элементов. В отличие от [14, 15] в работе предложен аналитический метод расчёта оптических элементов массива для различных форм освещаемых областей.

**1. Конструкция коллиматора**

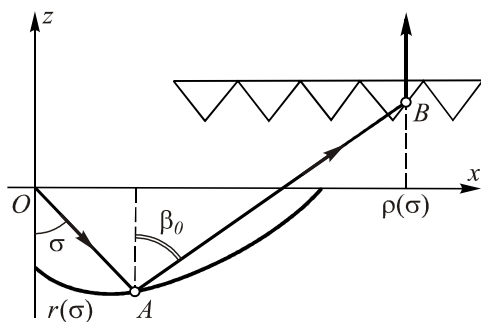


Рис. 2. Оптическая схема коллиматора

Для удобства читателя в данном пункте приведено краткое описание коллиматора, предложенного в [19, 20]. Схема коллиматора приведена на рис. 2. Коллиматор является телом вращения с осью Oz, соответственно на рис. 2 показано сечение коллиматора при x > 0. Коллиматор состоит из рефлектора и преломляющего оптического элемента (пластины). На внутренней поверхности пластины выполнен рельеф, соответствующий набору призм. Принцип работы коллиматора состоит в следующем. Лучи от источника отражаются от зеркала и затем испытывают ПВО на гранях призм. Ломаная линия OAB на рис. 2 показывает ход одного из лучей. Луч, вышедший из источника под углом sigma, отражается от рефлектора в точке A под углом beta\_0 и падает на одну из призм (первая грань призмы перпендикулярна падающему лучу). Далее луч испытывает ПВО в точке B на второй грани призмы и выходит из коллиматора параллельно оптической оси.

Профиль рефлектора соответствует поворнутой на угол beta\_0 параболе:

$$r(\sigma) = r_0 \cos^2\left(\frac{\beta_0}{2}\right) / \cos^2\left(\frac{\sigma - \beta_0}{2}\right). \quad (1)$$

На рис. 3 приведён профиль коллиматора, рассчитанного при beta\_0 = 60°. В этом случае профили призм соответствуют равнобедренным треугольникам с углом при вершине 60° [20]. Толщина колли-

матора на рис. 3 составляет менее 5 мм при диаметре 30 мм. Отметим, что боковая стенка коллиматора на рис. 4 предполагается зеркальной. В этом случае отражённый от боковой стенки пучок обрабатывает призмами пластины так же, как прямой пучок, отражённый от рефлектора. Отметим также, что поскольку рефлектор на рис. 4 соответствует параболе, поворнутой на угол beta = 60°, то центральная часть коллиматора с радиусом R approx 3,5 мм будет неосвещённой. Это позволяет разместить в центральной части коллиматора чип светодиода с радиатором.

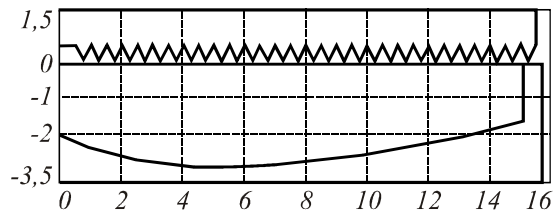


Рис. 3. Профиль рефлектора и пластины с призмами

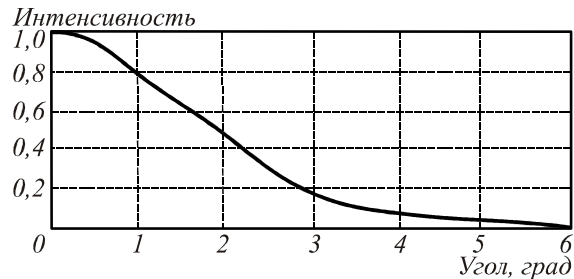


Рис. 4. Зависимость нормированной интенсивности света выходного пучка коллиматора от угла (Zemax)

Рабочие характеристики коллиматора на рис. 4 с зеркальной боковой стенкой были исследованы в пакете прикладных программ Zemax [21]. Данная программа предназначена для моделирования работы светотехнических систем с использованием метода трассировки лучей. В качестве источника излучения использовалась площадка размерами 1x1 мм<sup>2</sup>, излучающая по закону Ламберта. В качестве материалов рефлектора и преломляющей пластины использовались алюминий и полиметилметакрилат (показатель преломления n = 1,49), соответственно. Результаты моделирования распределения интенсивности, формируемого коллиматором, представлены на рис. 4. Эффективность коллиматора составила 84% при полном угле расходимости менее 4°.

**2. Расчёт микролинзового массива для формирования заданного распределения освещённости**

На нижней поверхности пластины коллиматора (рис. 3) нанесена структура из призм, обеспечивающая коллимацию лучей (рис. 2, 3). Для освещения областей заданной формы на верхней поверхности пластины предлагается использовать микролинзовый массив.

Будем считать, что освещаемая область G' имеет такую форму, что с помощью операций параллельного переноса этой области вдоль некоторых векто-

ров  $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2$  можно покрыть всю плоскость. В математике такая операция называется замощением плоскости [22–24]. Условию замощения удовлетворяет широкий круг областей, включающий квадрат, прямоугольник, параллелограмм, ромб, правильный шестиугольник. Данному условию также удовлетворяют области, имеющие криволинейные «параллельные» границы, как показано на рис. 5.

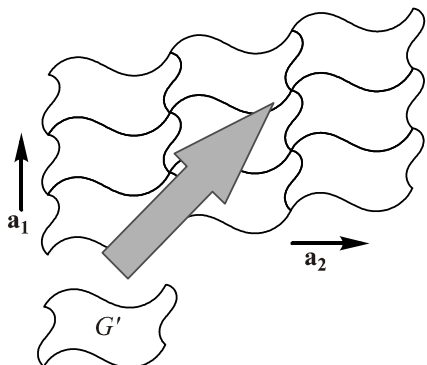


Рис. 5. Замощение плоскости областью  $G'$  с криволинейными границами

Для формирования постоянной освещённости в области указанной формы предлагается представить выходную апертуру коллиматора в виде объединения областей (ячеек) такой же формы. Размер ячейки будем считать достаточно малым, чтобы распределение освещённости в пределах каждой ячейки можно было бы считать постоянным, а погрешностью аппроксимации границы апертуры можно было пренебречь. Будем также предполагать, что расстояние  $f$  до плоскости, в которой требуется сформировать постоянное распределение освещённости значительно больше размеров ячейки. При указанных условиях решение задачи формирования равномерного распределения освещённости может быть получено с использованием массива (растра) одинаковых оптических элементов, каждый из которых формирует заданную область  $G'$ . В качестве примера на рис. 6. представлена геометрия задачи расчёта оптического элемента в случае квадратной области.

Расчёт оптического элемента сводится к расчёту преломляющей поверхности в области  $G$  ячейки, осуществляющей операцию масштабирования и сдвига. Без ограничения общности будем считать, что выходная плоскость коллиматора совпадает с плоскостью  $z=0$ . В этом случае преобразование масштабирования имеет вид:

$$T(x, y, 0) = (x_0 + ax, y_0 + ay, f), \tag{2}$$

где  $T$  – оператор сдвига и масштабирования,  $(x, y, 0)$  – декартовы координаты точки в выходной плоскости коллиматора,  $a$  – коэффициент масштаба, равный отношению размеров освещаемой области и ячейки.

Рассмотрим расчёт преломляющей поверхности  $z = S(x, y)$ ,  $(x, y) \in G$  для выполнения операции сдвига и масштабирования. Поскольку на поверхность  $z = S(x, y)$  падает пучок с плоским волновым

фронт, то эйконал на поверхности будет  $\Psi(x, y) = nS(x, y)$ , где  $n$  – показатель преломления материала элемента. В этом случае уравнения наклонов [25] имеют вид:

$$\frac{\partial S(x, y)}{\partial x} = n \frac{\partial z(x, y)}{\partial x} = p_x(x, y) + \frac{dz(x, y)}{dx} p_z(x, y),$$

$$\frac{\partial S(x, y)}{\partial y} = n \frac{\partial z(x, y)}{\partial y} = p_y(x, y) + \frac{dz(x, y)}{dy} p_z(x, y),$$

или

$$\frac{\partial z(x, y)}{\partial x} = \frac{p_x(x, y)}{n - p_z(x, y)},$$

$$\frac{\partial z(x, y)}{\partial y} = \frac{p_y(x, y)}{n - p_z(x, y)}, \tag{3}$$

где  $\mathbf{p}(x, y) = (p_x(x, y), p_y(x, y), p_z(x, y))$  – единичный вектор преломлённого луча (рис. 7).

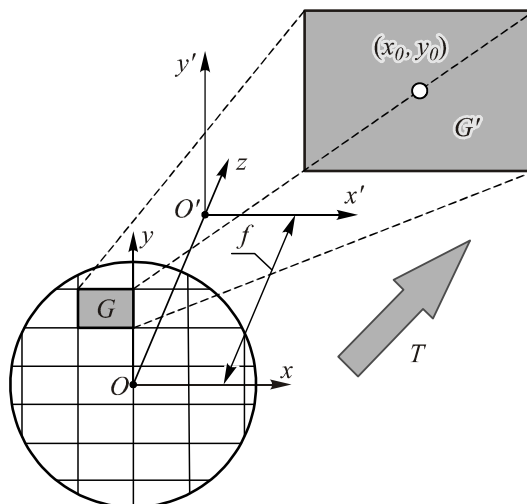


Рис. 6. Схема работы микролинзового массива

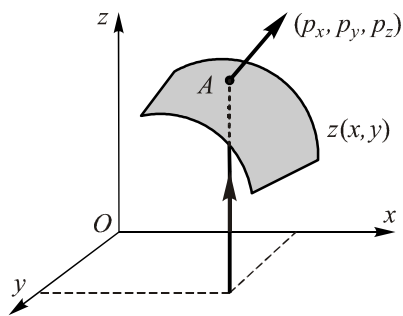


Рис. 7. Расчёт профиля  $z(x, y)$

Для операции масштабирования и сдвига вектор  $\mathbf{p}(x, y)$  должен иметь вид:

$$\mathbf{p}(x, y) = \frac{(gx + x_0, gy + y_0, f)}{\sqrt{(gx + x_0)^2 + (gy + y_0)^2 + f^2}}, \tag{4}$$

где  $g = a$ . Уравнение (4) записано в предположении малости размера ячейки  $G$  относительно расстояния  $f$  до освещаемой области и её размеров. Подставляя (4) в уравнения наклонов (3), получим следующие уравнения:

$$\frac{\partial z(x, y)}{\partial x} = \frac{gx + x_0}{n\sqrt{(gx + x_0)^2 + (gy + y_0)^2 + f^2 - f}},$$

$$\frac{\partial z(x, y)}{\partial y} = \frac{y(a-1) + y_0}{n\sqrt{(gx + x_0)^2 + (gy + y_0)^2 + f^2 - f}}. \quad (5)$$

Из (5) несложно получить уравнение преломляющей поверхности в виде:

$$z(x, y) = \frac{1}{ng} \sqrt{(gx + x_0)^2 + (gy + y_0)^2 + f^2} + \frac{f}{n^2 g} \ln \left( n\sqrt{(gx + x_0)^2 + (gy + y_0)^2 + f^2 - f} \right) + C, \quad (6)$$

где  $C$  – константа.

Рассмотрим общий случай операции масштабирования-сдвига с двумя коэффициентами:

$$T(x, y, 0) = (x_0 + ax, y_0 + by, f). \quad (7)$$

В этом случае вектор преломлённого луча в (3) должен иметь вид

$$\mathbf{p}(x, y) = \frac{(gx + x_0, qy + y_0, f)}{\sqrt{(gx + x_0)^2 + (qy + y_0)^2 + f^2}}, \quad (8)$$

где  $q = b$ . Подставляя (8) в (3), получим для расчёта поверхности следующие уравнения:

$$\frac{\partial z(x, y)}{\partial x} = \frac{gx + x_0}{n\sqrt{(gx + x_0)^2 + (qy + y_0)^2 + f^2 - f}},$$

$$\frac{\partial z(x, y)}{\partial y} = \frac{qy + y_0}{n\sqrt{(gx + x_0)^2 + (qy + y_0)^2 + f^2 - f}}. \quad (9)$$

При произвольных  $g \neq 0, q \neq 0$  в (9) смешанные частные производные  $\frac{\partial z(x, y)}{\partial x \partial y}, \frac{\partial z(x, y)}{\partial y \partial x}$  не совпадают.

Вследствие этого общее преобразование масштабирования (7) не может быть реализовано одной преломляющей поверхностью. В важном частном случае операции масштабирования только по оси  $Ox$  ( $q = 0, b = 1$ ) уравнение преломляющей поверхности несложно получить из (9) в виде:

$$z(x, y) = z(x) = \frac{1}{ng} \sqrt{(gx + x_0)^2 + f^2} + \frac{f}{n^2 g} \ln \left( n\sqrt{(gx + x_0)^2 + f^2 - f} \right) + C. \quad (10)$$

В параксиальном приближении (при  $f^2 \gg (gx)^2 + (qy)^2$ ) уравнения (9) примут вид:

$$\frac{\partial z(x, y)}{\partial x} = \frac{gx + x_0}{f(n-1)}, \quad \frac{\partial z(x, y)}{\partial y} = \frac{qy + y_0}{f(n-1)}. \quad (11)$$

Согласно (11) в параксиальном приближении операция общего масштабирования (7) может быть реализована с помощью поверхности

$$z(x, y) = \frac{1}{2f(n-1)} (gx^2 + 2x_0x + qy^2 + 2y_0y) + C. \quad (12)$$

### 3. Результаты расчёта

Для формирования требуемого распределения освещённости использовалась оптическая система, состоящая из коллиматора (рис. 3) и пластины с массивом линз свободной формы. Пример пластины для случая равномерного освещения квадрата приведён на рис. 8.

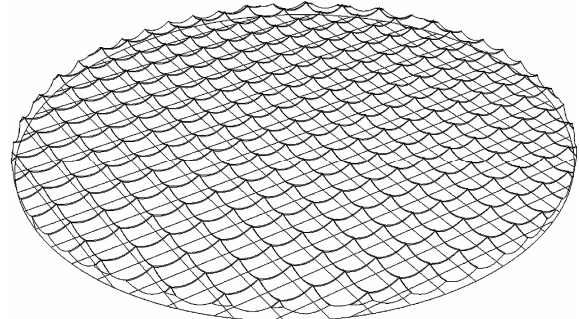


Рис. 8. Пластина с массивом линз свободной формы для получения квадратной равномерно засвеченной области

Формы рассчитанных поверхностей оптических элементов (элементов массива микролинз), формирующие равномерное освещение области в виде квадрата, линии и прямоугольника, представлены на рис. 9а–в). При этом коэффициент подобия  $a$  равен 250, а размер одной ячейки для случаев рис. 9а и 9б составляет  $2 \times 2 \text{ мм}^2$ , а для случая рис. 9в –  $1 \times 2 \text{ мм}^2$ .

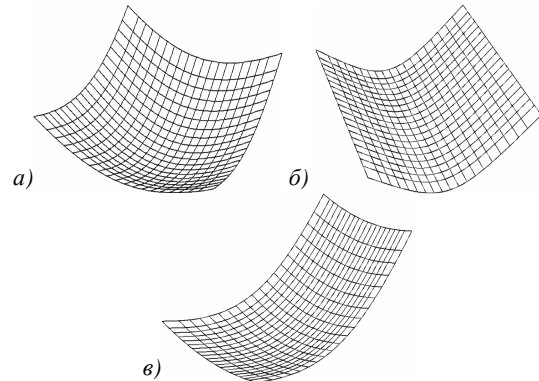


Рис. 9. Поверхности линз, формирующие ДН в виде квадрата (а), линии (б), прямоугольника (в), удалённых на расстояние 500 мм от источника

Результаты численного моделирования комбинированного оптического элемента, состоящего из коллиматора (рис. 3) и раstra линз, в пакете прикладных программ Zemax приведены на рис. 10а–в) и показывают, что рассчитанные элементы раstra (рис. 9) обеспечивают высокую равномерность освещения заданных областей (квадрат, линия и прямоугольник). При этом в качестве источника излучения в коллиматоре использовалась площадка  $1 \times 1 \text{ мм}^2$ , излучающая по закону Ламберта.

В пункте 2 было отмечено, что освещаемая область  $G'$  и области ячейки массива микролинз  $G$  должны быть подобны с коэффициентом подобия  $a$ . В общем случае освещаемая область может быть представлена в виде набора элементарных фигур, каждая из которых создаётся частью микролинз массива.

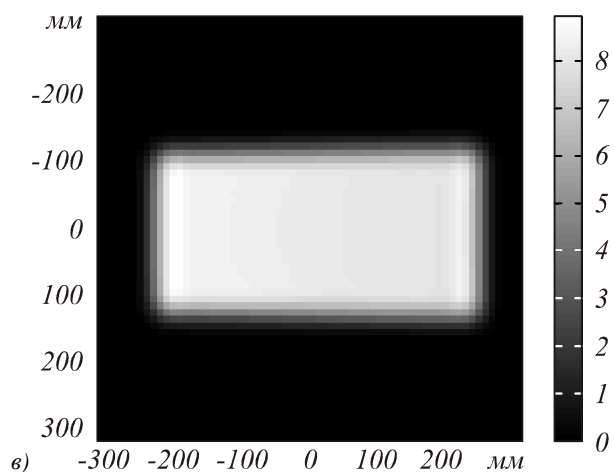
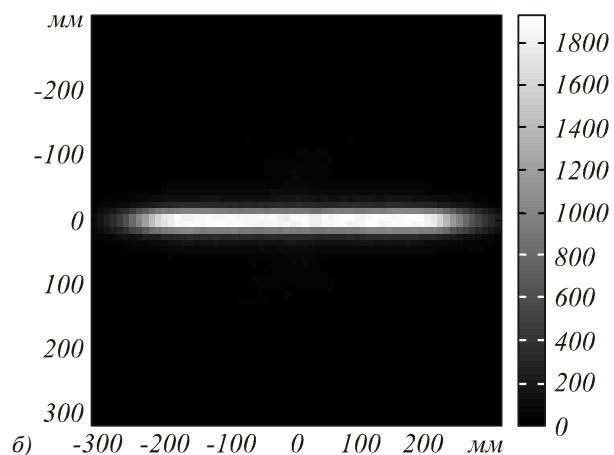
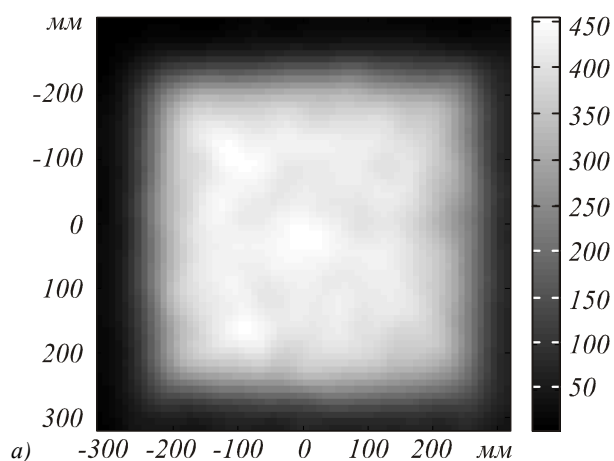


Рис. 10. Распределения освещённости (Лк) для квадратной (а), линейной (б) и прямоугольной (в) областей, удалённых на расстояние 500 мм от источника

Это позволяет значительно расширить круг формируемых областей. В качестве примера на рис. 11а приведено расчётное распределение освещённости в виде креста, которое формируется с использованием набора микролинз различных типов (рис. 11б). Массив микролинз на рис. 11б содержит микролинзы четырёх типов, формирующих четыре различных отрезка, составляющие крест.

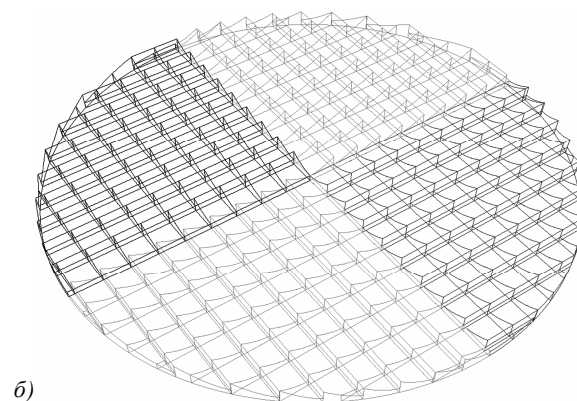
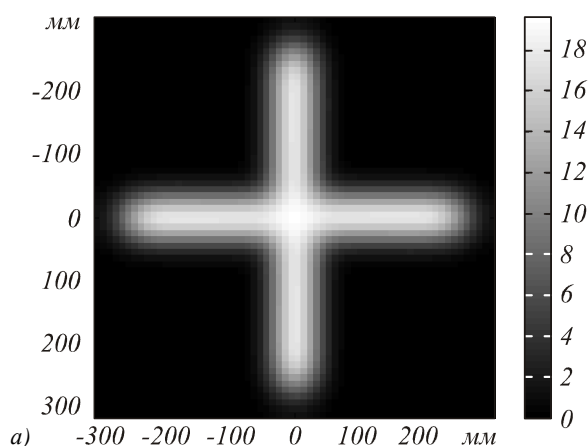


Рис. 11. Распределение освещённости (Лк) в виде креста (а), пластина с микролинзовым массивом, формирующая ДН в виде креста на расстоянии 100 мм от детектора (б)

Представляет интерес исследование работы массива микролинз в зависимости от угла расходимости падающего пучка. На рис. 12а–г представлены расчётные распределения освещённости в виде прямоугольника, формируемые массивом микролинз (вид линзы приведён на рис. 9в при различной расходимости освещающего пучка. Для рис. 12а–г расходимости освещающего пучка по уровню интенсивности 0,5 составляют 20°, 14°, 7° и 4°, соответственно. Для моделирования пучка с заданной расходимостью использовалась излучающая площадка, размер и форма которой соответствовали размеру и форме массива микролинз. При этом каждая точка площадки излучала в пределах заданного угла расходимости.

Рис. 12 показывает улучшение точности формируемого прямоугольного распределения при уменьшении угла расходимости падающего пучка. Таким образом, для точного формирования заданной области расходимость пучка, формируемого коллиматором, имеет большое значение.

### Заключение

В работе получены формулы для поверхности оптических элементов, которые обеспечивают формирование постоянного распределения освещённости в области квадрата, прямоугольника, линии для

освещающего пучка с плоским волновым фронтом. Результаты моделирования оптических элементов, состоящих из коллиматора и массива оптических элементов, показывают высокую равномерность освещения заданных областей (квадрат, линия и пря-

моугольник). Предложен метод освещения сложных областей (таких как крест), которые можно разбить на элементарные составляющие, что позволяет значительно упростить расчёт и форму поверхности линз (рис. 11).

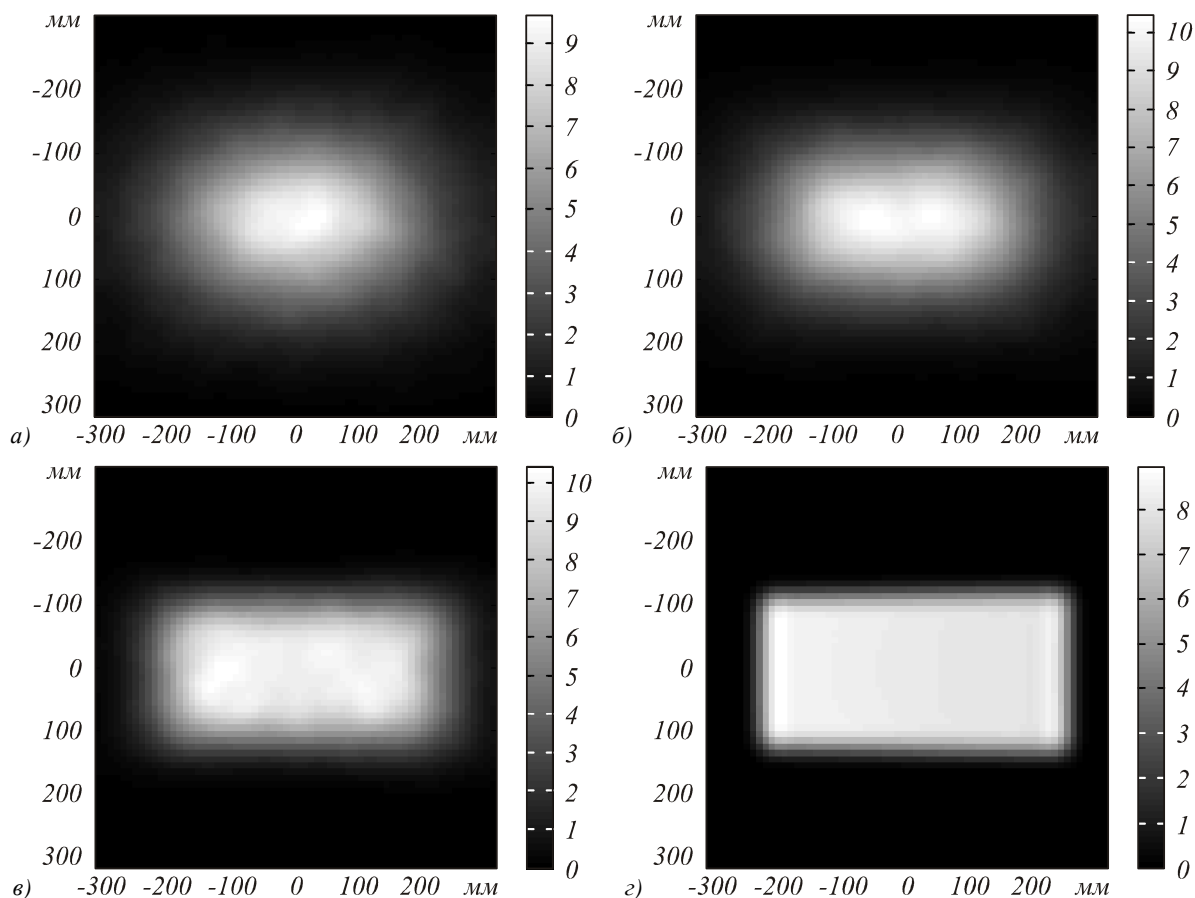


Рис. 12. Распределение освещённости ( $I_k$ ) в виде прямоугольника для случаев, когда расходимость после коллиматора пучка по уровню энергии 0,5, соответственно, равна  $20^\circ$  (а),  $17^\circ$  (б),  $7^\circ$  (в) и  $4^\circ$  (з)

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» (Государственный контракт № 07.514.11.4060).

### Литература

1. **Pengfei, P.** On a Monge-Ampere equation arising in geometric optics / P. Pengfei, W. Xu-Jia // J. Differential Geom. – 1998. – Vol. 48(2). – P. 205-223.
2. **Knowles, I.** Radially symmetric solutions of Monge-Ampere equation arising in the reflector mapping problem / I. Knowles [et al.] // Proceedings of the UAB International Conference on Differential Equations and Mathematical Physics, Lecture Notes in Math, 1987. – P. 361-374.
3. **Parkyn, W.** Free-form illumination lenses designed by a pseudo-rectangular lawnmower algorithm / W. Parkyn and D. Pelka // Proc. SPIE. – 2006. – Vol. 6338. – P. 633808-633815.
4. **Muschawek, H.R.** Tailoring freeform lenses for illumination / H.R. Muschawek // Proc. SPIE. – 2001. Vol. 4442. – P. 43-50.
5. **Winston, J.M.** Nonimaging Optics / J.M. Winston. – Elsevier, 2005.
6. **Fournier, F.** Designing freeform reflectors for extended sources / Florian R. Fournier, William J. Cassarly, Jannick P. Rolland // Proc. of SPIE. – 2009. – Vol. 7423. – P. 742302-742314.
7. **Fournier, F.** Fast freeform reflector generation using source-target maps / Florian R. Fournier, William J. Cassarly, Jannick P. Rolland // OPTICS EXPRESS. – 2010. – Vol. 18, N 5.
8. **Michaelis, D.** Cartesian oval representation of freeform optics in illumination systems / D. Michaelis, P. Schreiber and A. Bäuer / OPTICS LETTERS. – 2011. – Vol. 36, N 6.
9. **Досколович, Л.Л.** Расчёт преломляющих оптических элементов для формирования заданных распределений освещённости в прямоугольных областях с большим соотношением сторон / Л.Л. Досколович, М.А. Моисеев, А.Х. Султанов // Компьютерная оптика. – 2009. – Том 34, №4. – С. 469-475.

10. **Досколович, Л.Л.** Градиентный расчёт преломляющей сплайн-поверхности из условия формирования заданного распределения освещённости / Л.Л. Досколович, М.А. Моисеев // Компьютерная оптика. – 2010. – Том 33, №1. – С. 37-42.
11. **Wang, L.** Discontinuous free-form lens design for prescribed irradiance / L. Wang, K. Q, Y. Luo // Applied Optics. – 2008. – Vol. 6. – P. 3716-3723.
12. **Wang, L.** Design of compact freeform lens for application specific light-emitting diode packaging / Kai Wang, Fei Chen, Zongyuan Liu // Optics Express. – 2010. – Vol. 18, N 2.
13. **Wang, L.** Freeform LED lens for rectangularly prescribed illumination / L. Wang, S. Liu, F. Chen, Z. Qin, Z.Y. Liu and X.B. Luo // Pure Appl. Opt. – 2009.
14. **Sun, L.** Free-form microlens for illumination applications / Liwei Sun, Shangzhong Jin and Songyuan Cen // Applied Optics. – 2009. – Vol. 48, N 29.
15. **Wu, R.** Freeform lens arrays for off-axis illumination in an optical lithography system / Rengmao Wu, Haifeng Li, Zhenrong Zheng, Xu Liu // Applied Optics. – 2011. – Vol. 48, N 29. – P. 725-732.
16. **Marshall, T.** LED chip package with four LED chips and integrated optics for collimating and mixing the light / Thomas M. Marshall // US Patent Application, 2003. – 0076034 A1.
17. **Marshall, T.** LED collimation optics with improved performance and reduced size / Thomas M. Marshall // US Patent, 2004. – US 6547423 B2.
18. **Rizkin, A.** Portable luminaire / Alexander Rizkin // US Patent, 2005. – US 7744246 B2.
19. **Aslanov, E.** Ultra-slim collimator with an inverse design / Emil Aslanov, Nikolay Petrov, Alexey Borodulin, Georgy Tananaev // Proc. SPIE. – 2011. – Vol. 8170.
20. **Асланов, Э.** Тонкий коллиматор для светодиодов / Э. Асланов, Л. Досколович // Компьютерная оптика. – 2012. – Том 36, №1. – С. 96-101.
21. <http://www.zemax.com>
22. **Kemp, M.** Science in culture: A trick of the tiles / Martin Kemp // Nature. – 2005.
23. **Gardner, M** Penrose Tiles to Trapdoor Ciphers / Martin Gardner // Cambridge University Press, 1997.
24. **Гончаров, А.** Квазикристаллы и узоры Пенроуза / А. Гончаров // Квант. – 1986. – №6.
25. **Сойфер, В.** Расчёт ДОО в приближении геометрической оптики / Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.А. Сойфер. – М.: Физматлит, 2007. – С. 736.
6. **Fournier, F.** Designing freeform reflectors for extended sources / Florian R. Fournier, William J. Cassarly, Jannick P. Rolland // Proc. of SPIE. – 2009. – Vol. 7423. – P. 742302-742314.
7. **Fournier, F.** Fast freeform reflector generation using source-target maps / Florian R. Fournier, William J. Cassarly, Jannick P. Rolland // OPTICS EXPRESS. – 2010. – Vol. 18, N 5.
8. **Michaelis, D.** Cartesian oval representation of freeform optics in illumination systems / D. Michaelis, P. Schreiber and A. Bäuer // OPTICS LETTERS. – 2011. – Vol. 36, N 6.
9. **Doskolovich, L.L.** Design of refractive optical elements producing required irradiance distribution in the rectangular area with big aspect ratio / L.L. Doskolovich, M.A. Moiseev, A.Kh. Sultanov // Computer optics. – 2009. – Vol. 34, N 4. – P. 469-475. – (In Russian).
10. **Doskolovich, L.L.** Gradient evaluation of refractive spline surface for required light distribution / L.L. Doskolovich, M.A. Moiseev // Computer optics. – 2010. – Vol. 33, N 1. – P. 37-42. – (In Russian).
11. **Wang, L.** Discontinuous free-form lens design for prescribed irradiance / L. Wang, K. Q, Y. Luo // Applied Optics. – 2008. – Vol. 6. – P. 3716-3723.
12. **Wang, L.** Design of compact freeform lens for application specific light-emitting diode packaging / Kai Wang, Fei Chen, Zongyuan Liu // Optics Express. – 2010. – Vol. 18, N 2.
13. **Wang, L.** Freeform LED lens for rectangularly prescribed illumination / L. Wang, S. Liu, F. Chen, Z. Qin, Z.Y. Liu and X.B. Luo // Pure Appl. Opt. – 2009.
14. **Sun, L.** Free-form microlens for illumination applications / Liwei Sun, Shangzhong Jin and Songyuan Cen // Applied Optics. – 2009. – Vol. 48, N 29.
15. **Wu, R.** Freeform lens arrays for off-axis illumination in an optical lithography system / Rengmao Wu, Haifeng Li, Zhenrong Zheng, Xu Liu // Applied Optics. – 2011. – Vol. 48, N 29. – P. 725-732.
16. **Marshall, T.** LED chip package with four LED chips and integrated optics for collimating and mixing the light / Thomas M. Marshall // US Patent Application, 2003. – 0076034 A1.
17. **Marshall, T.** LED collimation optics with improved performance and reduced size / Thomas M. Marshall // US Patent, 2004. – US 6547423 B2.
18. **Rizkin, A.** Portable luminaire / Alexander Rizkin // US Patent, 2005. – US 7744246 B2.
19. **Aslanov, E.** Ultra-slim collimator with an inverse design / Emil Aslanov, Nikolay Petrov, Alexey Borodulin, Georgy Tananaev // Proc. SPIE. – 2011. – Vol. 8170.
20. **Aslanov, E.** Designing of slim collimator / E. Aslanov, L.L. Doskolovich // Computer optics. – 2012. – Vol. 36, N 1. – P. 96-101. – (In Russian).
21. <http://www.zemax.com>
22. **Kemp, M.** Science in culture: A trick of the tiles / Martin Kemp // Nature. – 2005.
23. **Gardner, M** Penrose Tiles to Trapdoor Ciphers / Martin Gardner // Cambridge University Press, 1997.
24. **Goncharov, A.** Quasi-crystals and patterns of Penrose // Quant. – 1986. – N 6. – (In Russian).
25. **Soifer, V.** Designing of DOE in geometrical optics approach / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer. – Moscow: "Physmatlit" Publisher, 2007. – P. 736. – (In Russian).

### References

1. **Pengfei, P.** On a Monge-Ampere equation arising in geometric optics / P. Pengfei, W. Xu-Jia // J. Differential Geom. – 1998. – Vol. 48(2). – P. 205-223.
2. **Knowles, I.** Radially symmetric solutions of Monge-Ampere equation arising in the reflector mapping problem / I. Knowles [et al.] // Proceedings of the UAB International Conference on Differential Equations and Mathematical Physics, Lecture Notes in Math, 1987. – P. 361-374.
3. **Parkyn, W.** Free-form illumination lenses designed by a pseudo-rectangular lawnmower algorithm / W. Parkyn and D. Pelka // Proc. SPIE. – 2006. – Vol. 6338. – P. 633808-633815.
4. **Muschaweck, H.R.** Tailoring freeform lenses for illumination / H.R. Muschaweck // Proc. SPIE. – 2001. Vol. 4442. – P. 43-50.
5. **Winston, J.M.** Nonimaging Optics / J.M. Winston. – Elsevier, 2005.

**DESIGNING OF SLIM OPTICS FOR PRESCRIBED LIGHT PATTERNS***E. Aslanov*<sup>1</sup>, *L.L. Doskolovich*<sup>2,3</sup>, *M.A. Moiseev*<sup>2,3</sup><sup>1</sup> *LG TCM,*<sup>2</sup> *Image Processing Systems Institute of Russian Academy of Sciences,*<sup>3</sup> *S.P. Korolyov Samara State Aerospace University***Abstract**

We present a small size optical system which makes uniform light distribution in required area. The system contains a slim collimator and a plate with a freeform lens array. We have got the analytical equation for freeform surface which makes uniform light distribution for 3 areas: square, rectangle and line. A method to illuminate complicated areas is presented and we investigated its partial case when the target area is a cross. We have simulated the optical system in Zemax and investigated dependence of freeform lens array's work on the divergence of the incident beam.

**Key words:** freeform, collimator, geometric optic, eikonal function, ray tracing.

**Сведения об авторах**

**Асланов Эмиль**, 1986 года рождения. В 2009 году с отличием окончил Московский государственный университет имени Н.Э. Баумана по специальности «Экологический мониторинг». С 2009 года работает инженером – исследователем в компании LG TCM. Является членом международного научного общества *SPIE*. Область научных интересов: геометрическая оптика, дифракционная оптика.

E-mail: [emil.aslanov@lge.com](mailto:emil.aslanov@lge.com).

**Emil Aslanov** (b. 1986) graduated with honors (2009) from Bauman Moscow State Technical University, majoring in Ecological Monitoring. He has been working in LG TCM as an optical R&D engineer since 2009. He is a SPIE member. His current research interests include geometrical optics, mathematical modeling, diffractive optics.

Сведения об авторе **Досколович Леонид Леонидович** – см. стр. 157 этого номера.



**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*. Моисеев М.А. – специалист в области решения обратных задач геометрической оптики. В списке научных работ М.А. Моисеева 14 статей и 2 авторских свидетельства.

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

E-mail: [mikhail@smr.ru](mailto:mikhail@smr.ru).

**Mikhail Alexandrovich Moiseev** (b. 1986) graduated with honors (2008) from the 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 Image Processing Systems Institute of the RAS (IPSI RAS). He is a SPIE member. He is co-author of 14 scientific papers and 2 inventions and patents. His current research interests include nonimaging optics.

Поступила в редакцию 26 марта 2012 г.