

# РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 535.318

## РАСЧЕТ ПРЕЛОМЛЯЮЩИХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ В ВИДЕ ПРЯМОУГОЛЬНИКА

© 2009 г. Л. Л. Досколович, доктор физ.-мат. наук; М. А. Моисеев

Институт систем обработки изображений РАН,  
Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева, Самара  
E-mail: mikhail@smr.ru

Предложена конструкция преломляющего оптического элемента для формирования прямоугольной диаграммы направленности при компактном источнике излучения. Расчет поверхностей оптического элемента сведен к решению тривиальных задач с цилиндрической симметрией. Приведены результаты численного моделирования рассчитанных элементов. Среднеквадратичная ошибка формирования равномерных прямоугольных распределений интенсивности составляет менее 10% при угловых размерах диаграмм направленности  $(120^\circ-180^\circ) \times (10^\circ-40^\circ)$ .

*Ключевые слова:* преломляющий являющийся элемент, полное внутреннее отражение, диаграмма направления.

Коды OCIS: 080.1753, 080.2740, 080.4298

Поступила в редакцию 17.02.2009

### Введение

Формирование заданных диаграмм направленности (ДН) является актуальным для задач лазерной оптики, радиофизики и светотехники. Задача расчета оптического элемента для формирования заданной ДН состоит в определении формы отражающих (или преломляющих) поверхностей элемента из условия, что отраженные (или преломленные) лучи имеют заданные направления. Решение данной задачи сводится к решению нелинейного дифференциального уравнения в частных производных типа Монже–Ампера [1–3]. В общем трехмерном случае решение данного уравнения является крайне сложным. Аналитическое решение возможно только в частных случаях с радиальной или продольной симметрией.

Для формирования однопараметрических ДН разработан ряд методов. В работах [4–6] приведено общее решение задачи расчета зеркала для формирования ДН в виде линии при точечном источнике излучения. Большое практическое значение имеет задача формирования ДН в виде отрезка, она является эталонной при формировании сложных ДН, состоящих из набора от-

резков [7, 8]. Расчет преломляющих оптических элементов для формирования ДН в виде линии в указанных работах не рассматривался. При расчете несимметричных оптических поверхностей для формирования двумерных ДН (например, в виде прямоугольника) используются сложные итерационные процедуры, требующие больших вычислительных затрат [9–14]. Рассмотренные в работах [9–14] преломляющие оптические элементы неприменимы для источников, излучающих в большом телесном угле. Это связано с ограниченными возможностями рефракционной поверхности при повороте лучей на большие углы.

В данной статье предложена конструкция преломляющего оптического элемента для формирования ДН в виде отрезка и вытянутого прямоугольника. Предлагаемые элементы рассчитаны на работу с компактным источником света (типа светодиода), излучающим в половину полного телесного угла. Расчет оптического элемента сводится к решению тривиальных задач с цилиндрической симметрией. В элементе используются преломляющие поверхности, работающие по принципу полного внутреннего отражения. Это позволяет достичь высокой световой эффек-

тивности при формировании вытянутой ДН с большим угловым размером. Преломляющие поверхности, работающие на полном внутреннем отражении, широко используются в радиально-симметричных коллиматорах светодиодов. Предложенная конструкция демонстрирует возможность использования данного подхода при формировании прямоугольных ДН.

## 1. Постановка задачи, конструкция элемента

Под ДН в виде прямоугольника понимается ДН, заданная единичной вектор-функцией двух аргументов в виде

$$\mathbf{p}(\beta, \mu) = (\sin \beta, \cos \beta \sin \mu, \cos \beta \cos \mu), \quad \beta \in [-\beta_{\max}, \beta_{\max}], \mu \in [-\mu_{\max}, \mu_{\max}], \quad (1)$$

где параметры  $\beta_{\max}, \mu_{\max}$  определяют размеры ДН. Функция (1) определяет направления лучей от оптического элемента через углы  $(\beta, \mu)$ , где  $\beta$  – угол между вектором луча и плоскостью  $Oyz$ , а  $\mu$  – угол между его проекцией на плоскость  $Oyz$  и оптической осью (осью  $Oz$ ). При этом на ДН должно быть сформировано заданное распределение интенсивности  $I(\beta, \mu)$ . Частным случаем ДН является ДН в виде отрезка

$$\mathbf{p}(\beta, \mu) = (0, \sin \mu, \cos \mu), \quad \mu \in [-\mu_{\max}, \mu_{\max}]. \quad (2)$$

Для формирования ДН (1) и (2) предлагается использовать конструкцию оптического элемента, изображенную на рис. 1. Точечный (компактный) источник света находится в начале координат и излучает в полусферу  $z > 0$ .

Для пояснения принципа работы оптического элемента первоначально рассмотрим более про-

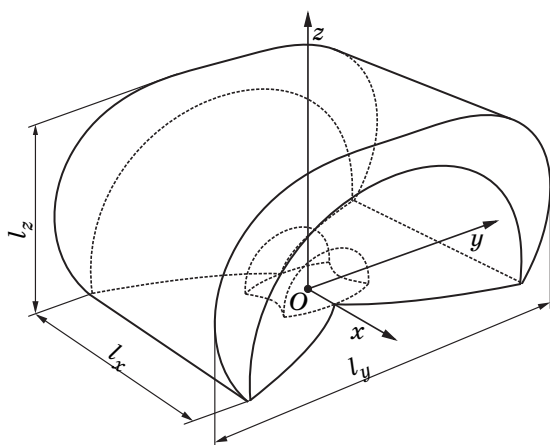


Рис. 1. Общий вид оптического элемента.

стую задачу формирования ДН в виде отрезка (2). Оптический элемент ограничен тремя поверхностями. Внутренняя и боковая поверхности элемента являются поверхностями вращения. Они получены вращением профиля на рис. 2 вокруг оси  $Ox$  и предназначены для формирования цилиндрического волнового фронта с осью  $Ox$ .

Внешняя поверхность является цилиндрической с образующим профилем, расположенным в плоскости  $Oyz$ . Внешняя поверхность предназначена для преобразования падающего цилиндрического пучка в пучок с заданной интенсивностью  $I_\mu(\mu)$  по углу  $\mu$ .

Коллимирующий профиль на рис. 2 состоит из трех частей: центральной ( $a$ ), средней ( $b$ ) и боковой ( $c$ ). Центральная часть коллимирует лучи от источника. Средняя часть формирует смещенный мнимый источник, уменьшая угловой размер пучка, падающего на боковую поверхность элемента. Боковая поверхность работает по принципу полного внутреннего отражения и формирует коллимированный пучок, распространяющийся вдоль оси  $Oz$ .

Приведенная конструкция оптического элемента является эффективной только при формировании ДН в виде отрезка с большим угловым размером  $\mu_{\max}$ . Это связано с ростом френелевских потерь и явлением полного внутреннего отражения, возникающих при использовании внешней преломляющей поверхности для поворота лучей на большой угол [9]. При размере ДН  $\mu_{\max}$  максимальный угол поворота лучей, осуществляемый внешней цилиндрической поверхностью, составляет  $(\pi/2) - \mu_{\max}$ . Согласно результатам расчета в разделе 4, при показателе преломления материала  $n = 1,5$  и максимальном угле  $\mu_{\max} > 40^\circ$  френелевские потери составляют менее 12 %.

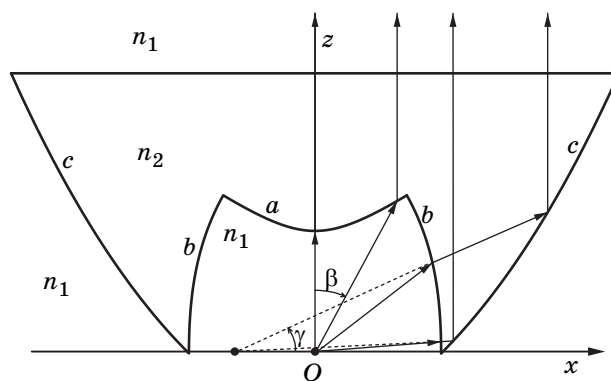


Рис. 2. Схема сечения оптического элемента плоскостью  $Oxz$ .

Формирование ДН в виде прямоугольника основано на использовании в качестве профиля на рис. 2 профиля для формирования одномерной ДН с угловым размером  $[-\beta_{\max}, \beta_{\max}]$  и распределением интенсивности  $I_\beta(\beta)$ . В этом случае будем считать, что функция  $I(\beta, \mu)$  является функцией с разделяемыми переменными (важный частный случай – равномерное распределение интенсивности)

$$I(\beta, \mu) = I_\beta(\beta)I_\mu(\mu). \quad (3)$$

Несмотря на то что рассмотренный подход к формированию прямоугольной ДН является приближенным, результаты численного моделирования, приведенные в разделе 4, демонстрируют его высокую работоспособность при  $\beta_{\max} < 20^\circ$ .

Таким образом, расчет оптического элемента сводится к расчету двух образующих профилей, которые полностью определяют форму всех преломляющих поверхностей.

Следует отметить, что идея использования поверхности, работающей по принципу полного внутреннего отражения, применяется в коллиматорах компании *Philips Lumileds Lighting*. Однако в них используются радиально-симметричные поверхности, полученные вращением профиля на рис. 2 вокруг оси  $Oz$ .

## 2. Расчет оптического элемента, формирующего диаграмму направленности в виде отрезка

Для формирования ДН в виде отрезка с интенсивностью  $I(\mu)$  необходимо рассчитать коллимирующий профиль на рис. 2 и цилиндрический внешний профиль.

Центральная часть  $a$  внутреннего профиля на рис. 2 является поверхностью коллимирующей линзы. Фокус линзы совпадает с источником излучения. Уравнение для длины радиус-вектора центральной части  $a$  несложно получить из принципа Ферма в виде

$$r_a(\beta) = r_{0a} \frac{1 - 1/n}{\cos(\beta) - 1/n}, \quad (4)$$

где  $r_{0a}$  – расстояние от источника до центра линзы,  $n = n_2/n_1$  – относительный показатель преломления.

Средняя часть  $b$  должна создавать мнимый источник излучения. При расчете части  $b$  также используется принцип Ферма, согласно которому значение функции эйконала должно быть посто-

янным на любой окружности с центром в мнимом фокусе. Данное условие имеет вид

$$r_b(\beta) - n\sqrt{l_s^2 + r_b^2(\beta)} + 2l_s r_b(\beta)\sin(\beta) = \Psi_0, \quad (5)$$

где  $r_b(\beta)$  – длина радиус-вектора средней части  $b$  профиля (рис. 2),  $l_s$  – расстояние от источника до мнимого фокуса. Константа  $\Psi_0$  в выражении (5) выбирается из условия совпадения частей профиля  $a$ ,  $b$  в точке стыковки. Согласно условию (5) расчет  $r_b(\beta)$  сводится к решению квадратного уравнения.

Боковая часть  $c$  внутреннего профиля является параболой, фокус которой совпадает с мнимым источником. Длина радиус-вектора точки параболы относительно точки мнимого фокуса определяется как

$$r_c(\gamma) = \frac{2r_{0c}}{1 - \sin\gamma},$$

где  $r_{0c}$  – расстояние от мнимого фокуса до нижнего края бокового профиля,  $\gamma$  – угол между вектором, проведенным от мнимого фокуса к точке поверхности, и осью  $Ox$ .

Внешняя поверхность оптического элемента предназначена для перераспределения потока излучения по углу  $\mu$ . Расчет преломляющих поверхностей рассмотрен в работе [15]. Дифференциальное уравнение для длины радиус-вектора направляющей внешнего профиля имеет вид [15]

$$\frac{dr(\mu_0)}{d\mu_0} = -r(\mu_0) \frac{\sin[\mu_0 + \mu(\mu_0)]}{n - \cos[\mu_0 + \mu(\mu_0)]}, \quad (7)$$

где  $\mu_0$  – угловая координата падающего луча,  $\mu$  – угол в ДН (2). Угол  $\mu_0$  отсчитывается в плоскости  $Oyz$  от оси  $Oz$ . Функция  $\mu = \mu(\mu_0)$  в уравнении (7) определяется из условия формирования заданного распределения интенсивности  $I(\mu)$  на ДН. Для определения  $\mu = \mu(\mu_0)$  используется закон сохранения светового потока. По построению элемента световой поток, излученный источником в телесный угол между плоскостями  $z = \text{ctg}(\mu_0)y$ ,  $z = \text{ctg}(\mu_0 + \Delta\mu_0)y$ , переходит в световой поток  $\Delta\Phi = I(\mu(\mu_0))\Delta\mu(\mu_0)$ ,  $\Delta\mu(\mu_0) = \mu(\mu_0 + \Delta\mu_0) - \mu(\mu_0)$  на ДН. Введем  $\beta_0$  – угол между вектором падающего луча и плоскостью  $Oyz$ . Элемент телесного угла в координатах  $(\mu_0, \beta_0)$  определяется выражением

$$d\Omega = \cos(\beta_0)d\beta_0d\mu_0. \quad (8)$$

Соответственно дифференциальная форма закона сохранения светового потока имеет вид

$$\left( \int_{-\pi/2}^{\pi/2} I_0(\beta_0, \mu_0) \cos(\beta_0) d\beta_0 \right) d\mu_0 = I(\mu) d\mu, \quad (9)$$

где  $I_0(\beta_0, \mu_0)$  – интенсивность источника излучения. Согласно уравнению (9) функция  $\mu(\mu_0)$  в выражении (7) определяется из решения следующего дифференциального уравнения:

$$\frac{d\mu(\mu_0)}{d\mu_0} = \frac{1}{I[\mu(\mu_0)]} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} I_0(\beta_0, \mu_0) \cos(\beta_0) d\beta_0, \quad (10)$$

$$\mu(\pm\pi/2) = \pm\mu_{\max}.$$

В случае ламбертовского источника излучения  $[I_0(\beta_0, \mu_0)] \sim [\cos(\mu_0) \cos(\beta_0)]$  и постоянной интенсивности  $I(\mu) = I$ ,  $\mu \in [-\mu_{\max}, \mu_{\max}]$  из уравнения (10) получим

$$\mu(\mu_0) = \mu_{\max} \sin(\mu_0) / \sin(\mu_{\max}). \quad (11)$$

Таким образом, для ламбертовского источника расчет внешнего профиля сводится к интегрированию дифференциального уравнения (7), разрешенного относительно производной. Для решения данного уравнения достаточно использовать стандартный численный метод Рунге–Кутты.

### 3. Расчет оптического элемента, формирующего диаграмму направленности в виде прямоугольника

Для формирования ДН в виде прямоугольника необходимо рассчитать профиль на рис. 2 из условия формирования одномерной ДН с интенсивностью  $I_\beta(\beta)$ ,  $\beta \in [-\beta_{\max}, \beta_{\max}]$ . Расчет центральной части  $a$  нижнего профиля сводится к решению дифференциального уравнения для радиус-вектора этой поверхности [15]

$$\frac{dr_a(\beta_0)}{d\beta_0} = -r_a(\beta) \frac{\sin[\beta_0 + \beta_a(\beta_0)]}{1/n - \cos[\beta_0 + \beta_a(\beta_0)]}, \quad (12)$$

где  $\beta_0$  и  $\beta_a(\beta_0)$  – угловые координаты падающего от источника луча и преломленного луча.

Часть  $b$  профиля определяется уравнением (5). Часть  $c$  профиля рассчитывается аналогично центральной части из решения следующего дифференциального уравнения [16]:

$$\frac{dr_c(\gamma)}{d\gamma} = r_c(\gamma) \operatorname{ctg} \frac{\pi/2 - \gamma - \beta_c(\gamma)}{2}. \quad (13)$$

Функции соответствия  $\beta_a(\beta)$  и  $\beta_c(\gamma)$  определяются из закона сохранения светового потока.

Для случая ламбертовского источника излучения и равномерного распределения интенсивности  $I_\beta(\beta) = I$ ,  $\beta \in [-\beta_{\max}, \beta_{\max}]$  на ДН указанные функции несложно получить в виде

$$\beta_a(\beta_0) = \arcsin \left( \frac{1 - 2\beta_0 + \sin(2\beta_0)}{n - 2\beta_{\text{bord}} + \sin(2\beta_{\text{bord}})} \sin \beta_{\max} \right),$$

$$\beta_0 \in [0, \beta_{\text{bord}}], \quad (14)$$

$$\beta_c(\beta_0) = \arcsin \left( \frac{1 - \pi - \beta_0(\gamma) - \sin(2\beta_0(\gamma))}{n - \pi - \beta_{\text{bord}} - \sin(2\beta_{\text{bord}})} \sin \beta_{\max} \right),$$

$$\beta_0 \in [\beta_{\text{bord}}, \pi/2], \quad (15)$$

где  $\beta_{\text{bord}}$  – значение угла  $\beta_0$ , определяющее границу между частями  $a$  и  $b$  преломляющей поверхности.

### 4. Результаты расчета оптических элементов

С помощью предложенного метода был рассчитан оптический элемент, формирующий ДН в виде отрезка с угловым размером  $120^\circ$ . Расчет производился для ламбертовского источника излучения с помощью выражений (4)–(7), (11) при параметрах  $r_{0a} = 3$  мм,  $n = 1,5$ . Габаритные размеры полученного элемента (рис. 1) составляют  $l_x = 23$  мм,  $l_y = 36$  мм,  $l_z = 22$  мм. Моделирование формируемой ДН проводилось методом трассировки лучей с использованием специализированной программы по светотехнике *TracePro*. На рис. 3 приведено расчетное распределение интенсивности, полученное при трассировке 100 000 лучей. Размер и вид полученной ДН совпадают с заданными, что подтверждает правильность использованных расчетных формул.

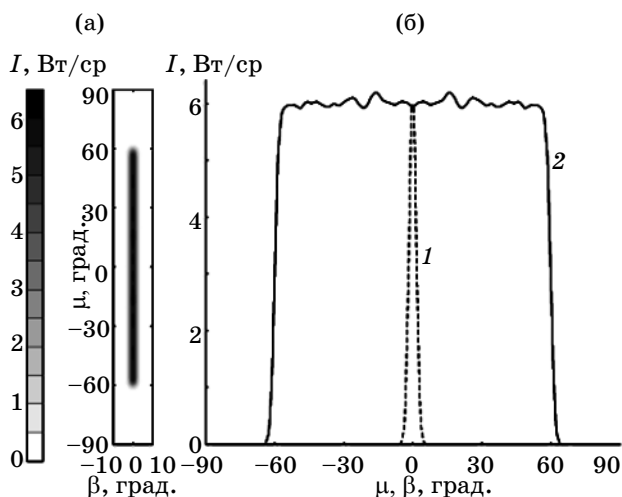
В качестве следующего примера был рассчитан оптический элемент, формирующий ДН в виде прямоугольника со сторонами  $120^\circ$  и  $30^\circ$ . Расчет производился по формулам (5), (7), (11)–(15) при  $r_{0a} = 3$  мм,  $n = 1,5$ . Результат моделирования формируемой ДН при 100 000 лучах приведен на рис. 4. Габаритные размеры полученного элемента составляют  $l_x = 16$  мм,  $l_y = 26$  мм,  $l_z = 16$  мм (рис. 1). Несмотря на то что предложенный способ формирования прямоугольной ДН является приближенным, расчетное распределение интенсивности на рис. 4 очень близко к равномерному прямоугольному распределению. Среднеквадратичное отклонение интенсивности  $\delta$  от постоянного значения составляет всего 5,27%. Для оценки световой эффективности рассчитываемых оптических элементов введем

энергетическую эффективность  $E$ . Определим  $E$  как отношение светового потока, попадающего в заданную прямоугольную ДН, к общему световому потоку, излучаемому источником. Для рассмотренного примера  $E = 90,6\%$ .

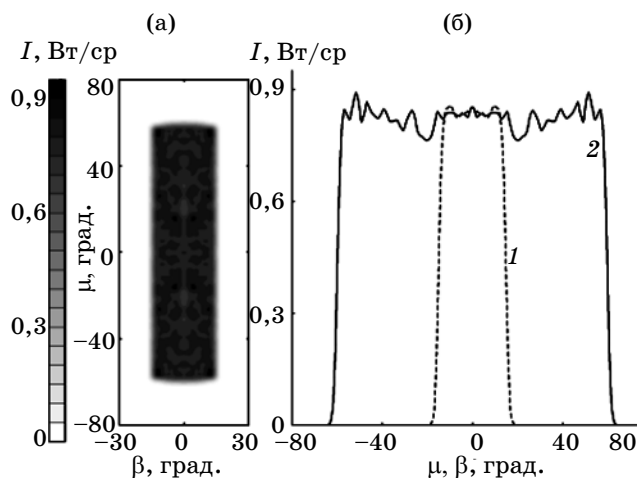
В таблице приведены среднеквадратичные ошибки  $\delta$  формирования равномерных прямоугольных распределений интенсивности для различных размеров ДН  $\mu_{\max}$ ,  $\beta_{\max}$ . Темно-серым цветом отмечены ячейки, для которых  $\delta > 10\%$ , светло-серым – ячейки, для которых

$6\% < \delta < 10\%$ , белым – ячейки с  $\delta < 6\%$ . Результаты расчета показывают, что при  $\beta_{\max} \in [0^\circ, 20^\circ]$  и  $\mu_{\max} \in [60^\circ, 90^\circ]$  ошибка  $\delta < 10\%$ , и предложенный метод можно считать эффективным. Для всех приведенных в таблице случаев  $E > 88\%$ .

Представленные выше результаты получены при точечных источниках излучения. Метод сохраняет работоспособность и при существенно размерных источниках. На рис. 5 показана ДН, рассчитанная для протяженного ламбертовского источника излучения в виде квадратной пло-



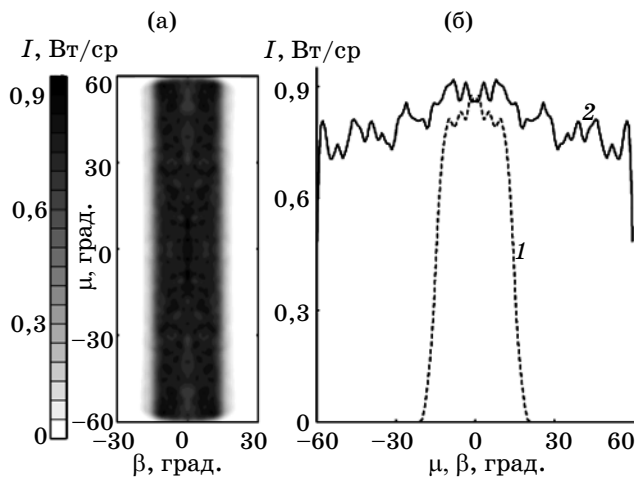
**Рис. 3.** Результат моделирования ДН в виде отрезка от точечного источника излучения. Полутоновое распределение интенсивности (а) и распределения интенсивностей в продольном (1) сечении ( $\beta = 0$ ) и поперечном (2) сечении ( $\mu = 0$ ) ДН (б).



**Рис. 4.** Результат моделирования ДН в виде прямоугольника от точечного источника излучения. Полутоновое распределение интенсивности (а) и распределения интенсивностей в продольном (1) сечении ( $\beta = 0$ ) и поперечном (2) сечении ( $\mu = 0$ ) ДН (б).

Значения среднеквадратичных отклонений для распределений интенсивности при различных расчетных параметрах  $\beta_{\max}$  и  $\mu_{\max}$

$\mu_{\max}$ , град	$\beta_{\max}$ , град				
	10	15	20	25	30
40	13,636668	21,223620	29,186936	37,193512	44,802091
45	8,080851	15,830128	22,650475	29,815869	36,904976
50	6,338234	9,952287	16,940362	23,505717	29,618178
55	6,658251	7,740987	11,618274	17,888691	24,504722
60	6,551218	5,279691	9,825235	13,615233	19,163747
65	5,455348	5,647607	7,308937	10,341646	15,683312
70	4,486473	5,915738	7,622344	8,056003	13,315979
75	5,589718	5,293142	4,845566	9,264132	10,843421
80	5,278770	4,412954	4,938739	6,151992	9,303015
85	5,878292	7,206034	4,769402	6,900053	10,461716
90	5,157605	6,704872	4,467609	7,213426	11,856597



**Рис. 5.** Результат моделирования ДН в виде отрезка от протяженного источника излучения. Полутоновое распределение интенсивности (а) и распределения интенсивностей в продольном (1) сечении ( $\mu = 0$ ) и поперечном (2) сечении ( $\mu = 0$ ) ДН (б).

щадки со стороной 1 мм. Соответствующая ДН, формируемая оптическим элементом при точечном источнике, приведена на рис. 4. ДН на рис. 5 является более размытой, однако среднеквадратичная ошибка  $\delta = 8,9\%$  остается низкой при высокой эффективности  $E = 85,83\%$ . Отметим, что размер источника всего в 3 раза меньше расстояния до части  $a$  профиля ( $r_{0a} = 3$  мм). Таким образом, даже при таких существенных размерах оптический элемент сохраняет хорошую работоспособность.

### Заключение

Предложена конструкция оптического элемента для формирования ДН в виде прямоугольника. Получены выражения для расчета поверхностей оптического элемента. Расчет поверхностей сведен к решению тривиальных задач с цилиндрической симметрией. Результаты численного моделирования показывают, что при размере ДН  $2\mu_{\max} > 90^\circ$  значение энергетической эффективности оптического элемента составляет более 90%. Среднеквадратичная ошибка формирования постоянного распределения интенсивности составляет менее 5% при размерах ДН  $\beta_{\max} \in [0^\circ, 20^\circ]$ ,  $\mu_{\max} \in [60^\circ, 90^\circ]$ . Рассчитанные элементы сохраняют свою рабо-

тоспособность при существенно протяженных источниках излучения.

Работа выполнена при поддержке фонда “Фундаментальные исследования и высшее образование” (RUXO-014-SA-06) и Фонда содействия отечественной науке.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Guan P., Wang X-J. On a Monge-Ampere equation arising in geometric optics // *J. Differential Geometry*. 1998. V. 48. № 2. P. 205–223.
2. Knowles I., Satio Y. Radially symmetric solutions of a Monge-Ampere equation arising in the reflector mapping problem (with P. Waltman) // *Proc. of the UAB International Conference on Differential Equations and Mathematical Physics, Lecture Notes in Math*. Springer-Verlag, 1987. P. 973–1000.
3. Oliker V., Treibergs A. *Geometry and Nonlinear Partial Differential Equations* // *Contemporary Mathematics*. 1992. V. 127. P. 1–154.
4. Досколович Л.Л., Казанский Н.Л. Расчет зеркала для формирования однопараметрической диаграммы направленности // *Автометрия*. 2004. Т. 40. № 5. С. 104–111.
5. Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Kharitonov S.I. Designing reflectors to generate a line-shaped directivity diagram // *J. of Mod. Opt.* 2005. V. 52. № 11. P. 1529–1536.
6. Досколович Л.Л., Харитонов С.И. Расчет формы поверхности зеркал для формирования изображения в виде линии // *Оптический журнал*. 2005. Т. 72. № 4. С. 34–37.
7. Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Bernard S. Designing a mirror to form a line-shaped directivity diagram // *J. of Mod. Opt.* 2007. V. 54. № 4. P. 589–597.
8. Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Тренина М.А. Расчет зеркала для формирования диаграммы направленности в виде отрезка // *Автометрия*. 2006. Т. 42. № 4. С. 67–75.
9. Muschaweck J., Ries H. Tailored freeform optical surface // *JOSA. A*. 2002. V. 19. № 3. P. 590–595.
10. Muschaweck J., Ries H. Tailoring freeform lenses for illuminations // *Proc. SPIE*. 2001. V. 4442. P. 43–50.
11. Hicks R.A. Designing a mirror to realize a given projection // *JOSA. A*. 2005. V. 22. № 2. P. 323–330.
12. Doyle S., Corcoran D., Connell J. Automated mirror design using an evolution strategy // *Opt. Engin.* 2001. V. 38. № 2. P. 323–333.
13. Белоусов А.А., Досколович Л.Л. Градиентный метод решения задачи фокусировки в двумерную

- область при протяженном источнике // Компьютерная оптика. 2007. Т. 31 № 3. С. 20–26.
14. Белоусов А.А., Досколович Л.Л., Харитонов С.И. Градиентный метод расчета оптических элементов для формирования заданной освещенности на криволинейной поверхности // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 3. С. 30–35.
15. Досколович Л.Л., Моисеев М.А. Расчет радиально-симметричных преломляющих поверхностей с учетом френелевских потерь // Компьютерная оптика. 2008. Т. 32. № 2. С. 201–203.
16. Elmer W.B. Optical design of reflectors // Appl. Opt. 1978. V. 17. № 7. P. 977–979.
-