

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 535.3

ВЛИЯНИЕ НАРУШЕНИЯ ВРАЩАТЕЛЬНОЙ СИММЕТРИИ НА АБЕРРАЦИИ ЛИНЗЫ С ОСЕВЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

© 2004 г. Р. Е. Ильинский, канд. техн. наук

Особое конструкторское бюро МЭИ, Москва
E-mail: ilinsky_r@mail.ru

Представлены формулы для расчета aberrаций второго порядка выпукло-плоской линзы с осевым распределением показателя преломления в случае, когда эквирефракционные плоскости не перпендикулярны оси симметрии линзы.

Коды OCIS: 220.1000.

Поступила в редакцию 13.02.2003.

В последнем десятилетии XX века началось серийное производство оптических элементов с осевым распределением показателя преломления [1, 2]. Эквирефракционными поверхностями в элементах с осевым распределением показателя преломления являются параллельные плоскости. Если оптическая система обладает вращательной симметрией, то эквирефракционные плоскости входящих в нее элементов с осевым распределением показателя преломления перпендикулярны оптической оси.

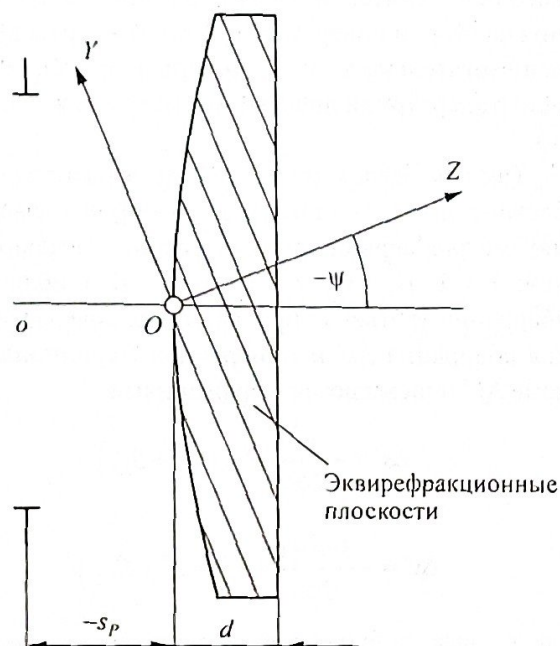
Линзы с осевым распределением показателя преломления, которые предназначены для коллимации или фокусировки параллельного пучка, в настоящее время чаще всего имеют выпукло-плоскую форму. При этом выпуклая сферическая поверхность обращена в сторону параллельного пучка лучей. Такая форма линзы наиболее технологична с точки зрения механической обработки и обеспечивает исправление сферической aberrации при малом перепаде показателя преломления.

Одним из важных вопросов, который необходимо решить при проектировании, производстве и контроле линз с осевым распределением показателя преломления, является обоснование и назначение допусков на отступления от вращательной симметрии. Хотя эта задача может быть решена и численно, но приближенные аналитические формулы обеспечивают более глубокое понимание этого вопроса.

В работах [3, 4] были представлены формулы коэффициентов aberrаций второго порядка для градиентной оптической системы с малыми нарушениями вращательной симметрии. В данной статье эти формулы использованы для определения комы второго порядка осевого пучка, обусловленной неперпендикулярностью эквирефракционных плоскостей

и оси симметрии обеих поверхностей выпукло-плоской линзы.

На рисунке показана линза, у которой первая поверхность сферическая, а вторая поверхность плоская. Показатели преломления пространства предметов и пространства изображений $n_1 = n_3 = 1$. Прямая o перпендикулярна второй поверхности линзы и проходит через точку O – вершину первой поверхности. Толщина линзы по оси равна d . Апертурная диафрагма находится на расстоянии s_p от вершины первой поверхности.



Выпукло-плоская линза с осевым распределением показателя преломления. Эквирефракционные плоскости не перпендикулярны оси симметрии линзы.

Введем систему координат $OXYZ$ таким образом, чтобы ось OZ была перпендикулярна эквирефракционным плоскостям. В системе координат $OXYZ$ показатель преломления материала линзы зависит только от координаты z : $n_2 = n_2(z)$. Будем считать, что прямая o и ось OZ лежат в меридиональной плоскости – плоскости рисунка. Угол между ними равен ψ .

Если $\psi = 0$, то линзу можно рассматривать как вращательно-симметричную оптическую систему. Ее параксиальные характеристики определяются по результатам расчета первого и второго вспомогательных лучей [5–7]. Углы и высоты первого вспомогательного луча, который проходит через осевую точку предмета, в выпукло-плоской линзе находятся из формул:

$$\alpha_{2,0} = \alpha_1 \frac{n_1}{n_2(0)} + \frac{n_2(0) - n_1}{n_2(0)} \rho h_1, \quad (1)$$

$$\alpha_{2,d} = \frac{\alpha_{2,0} n_2(0)}{n_2(d)}, \quad (2)$$

$$h_2 = h_1 - \alpha_{2,0} n_2(0) \int_0^d \frac{du}{n_2(u)}, \quad (3)$$

$$\alpha_3 = \frac{\alpha_{2,d} n_2(d)}{n_3}, \quad (4)$$

где h_1, h_2 – высоты первого вспомогательного луча на первой и второй поверхностях линзы; ρ – кривизна первой поверхности линзы; $\alpha_1, \alpha_{2,0}$ – углы первого вспомогательного луча до и после преломления на первой поверхности; $\alpha_{2,d}, \alpha_3$ – углы первого вспомогательного луча до и после преломления на второй поверхности. Углы и высоты второго вспомогательного луча, который проходит через центр апертурной диафрагмы, находятся аналогично.

Так как осевая точка предмета расположена в бесконечности, то примем следующую нормировку параметров первого и второго вспомогательных лучей: $h_1 = 1, H_1 = s_\rho, \alpha_1 = 0, \beta_1 = 1$. В приближении aberrаций третьего порядка продольная сферическая aberrация $\Delta s'$ и поперечная меридиональная кома $\Delta y'$ описываются выражениями

$$\Delta s' = -\frac{m^2}{2\alpha_3^2} (S_{1,1} + S_1^* + S_{2,1}), \quad (5)$$

$$\Delta y' = -\frac{3m^2 \tan \omega}{2\alpha_3} (S_{1,2} + S_2^* + S_{2,2}), \quad (6)$$

где m – высота луча на входном зрачке, ω – угол падающего на линзу луча с оптической осью. Определим коэффициенты aberrаций третьего порядка, обусловленные преломлением на первой сферической поверхности [5–7]:

$$S_{1,1} = -2 [\alpha_{2,0}^2 n_2(0) - \alpha_1^2 n_1] \rho h_1^2 - \rho^3 h_1^4 [n_1 - n_2(0)] - h_1 n_1 \alpha_1^3 + h_1 n_2(0) \alpha_{2,0}^3 + \rho^2 h_1^4 n_2, \quad (7)$$

$$S_{1,2} = - [\alpha_{2,0} \beta_{2,0} n_2(0) - \alpha_1 \beta_1 n_1] \rho h_1^2 - [\alpha_{2,0}^2 n_2(0) - \alpha_1^2 n_1] \rho h_1 H_1 - \rho^3 h_1^3 H_1 [n_1 - n_2(0)] - h_1 n_1 \alpha_1^2 \beta_1 + h_1 n_2(0) \alpha_{2,0}^2 \beta_{2,0} + \rho^2 h_1^3 H_1 n_2, \quad (8)$$

$$n_2 = \frac{\partial n_2(z)}{\partial z} \Big|_{z=0}. \quad (9)$$

Коэффициенты aberrаций третьего порядка, обусловленные преломлением на второй плоской поверхности, определяются как

$$S_{2,1} = h_2 n_3 \alpha_3^3 - h_2 n_2(d) \alpha_{2,d}^3, \quad (10)$$

$$S_{2,2} = h_2 n_3 \alpha_3^2 \beta_3 - h_2 n_2(d) \alpha_{2,d}^2 \beta_{2,d}, \quad (11)$$

а коэффициенты aberrаций третьего порядка, обусловленные переносом в среде с осевым распределением показателя преломления, определяем по формулам

$$S_1^* = n_2^3(0) \alpha_{2,0}^3 G, \quad S_2^* = n_2^3(0) \alpha_{2,0}^2 \beta_{2,0} G, \quad (12)$$

где

$$G = \frac{h_2}{n_2^2(d)} - \frac{h_1}{n_2^2(0)} + \alpha_{2,0} n_2(0) \int_0^d \frac{du}{n_2^3(u)}. \quad (13)$$

При $\psi \neq 0$ оптическая система перестает быть вращательно-симметричной. Следствием этого является появление aberrаций, несвойственных первоначальной вращательно-симметричной оптической системе. Так, для осевого пучка (его лучи параллельны прямой o) в фокальной плоскости появляется кома. В приближении aberrаций второго порядка меридиональная $\Delta g'$ и сагиттальная $\Delta G'$ составляющие комы осевого пучка [3, 4]

$$\Delta g' = \frac{R_2 (3m^2 + M^2)}{2n_3 \alpha_3}, \quad (14)$$

$$\Delta G' = \frac{R_2 m M}{n_3 \alpha_3}, \quad (15)$$

где

$$R_2 = \psi \rho h_1^3 n_2 - A S_{2,1} + B S_{2,2} - A S_1^* + B S_2^* + \psi \alpha_{2,d}^2 h_2 n_2(d) - n_2(d) \psi h_2 \alpha_3^2, \quad (16)$$

$$A = -H_1 n_2(0) \psi / V, \quad B = h_1 n_2(0) \psi / V, \\ V = n_1 (\alpha_1 H_1 - \beta_1 h_1) = -1.$$

Рассмотрим случай, когда показатель преломления материала линзы описывается функцией

$$n_2(z) = \sqrt{n_0^2 + az}, \quad (17)$$

где n_0 – показатель преломления в вершине линзы. Для выполнения аналитических преобразований,

связанных с подстановкой выражения (17) в формулы (1)–(4), (7)–(16), использовалась система аналитических вычислений [8]. Так как в статье [5] было показано, что коэффициенты aberrаций третьего порядка современных вращательно-симметричных линз с осевым распределением показателя преломления слабо зависят от толщины линзы, то окончательные выражения представим в виде двух членов ряда Тейлора по переменной d

$$\Delta g' = \psi a (3m^2 + M^2) \times \left[\frac{1}{4n_0(n_0-1)} - \frac{(1+n_0^2)(n_0-1)}{4n_0^3} d \right], \quad (18)$$

$$\Delta G' = \psi a m M \left[\frac{1}{2n_0(n_0-1)} - \frac{(1+n_0^2)(n_0-1)}{2n_0^3} d \right]. \quad (19)$$

Численный пример

В табл. 1 приведены конструктивные параметры градиентной линзы GPX 5-12.5, которая серийно выпускается фирмой "Light Path Technologies" [9]. Распределение показателя преломления в этой линзе можно аппроксимировать выражением (17) при $n_0 = 1,71$, $a = -0,1556$. Положение входного зрачка примем $s_p = -3$.

Таблица 1. Конструктивные параметры линзы GPX 5-12.5

r	d	Материал	Световой диаметр ($\varnothing_{\text{св}}$)	Стрелка по $\varnothing_{\text{св}}$
		воздух		
8,95			4,5	0,29
	2,0	G14SFN		
∞			4,5	0
		воздух		
Заднее фокусное расстояние $f' = 12,6056$ мм				
Задний фокальный отрезок $s'_{\text{ф}} = 11,4031$ мм				

Таблица 2. Кома осевого пучка

Расчетная формула	Аберрация второго порядка	Аберрация реальных лучей
$[\Delta g'(2,0, 0,0) + \Delta g'(2,0, 0,0)]/2,0$	$-0,949 \times 10^{-4}$	$-1,003 \times 10^{-4}$
$\Delta g'(0,0, 2,0)$	$-0,316 \times 10^{-4}$	$-0,327 \times 10^{-4}$
$[G'(\sqrt{2},0,\sqrt{2},0) + \Delta G'(-\sqrt{2},0,-\sqrt{2},0)]/2,0$	$-0,316 \times 10^{-4}$	$-0,338 \times 10^{-4}$

В табл. 2 указаны значения комы осевого пучка, которые были вычислены по формулам (18), (19) и в результате расчета реальных лучей при $\psi = 1'$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hunter B.V., Tyagi V., Tinch D.A., Fournier P. Current developments in GRADIUM glass technology // Proc. SPIE. 1998. V. 3482. P. 789–800.
2. Turner M.G., Moore K.E. Optical design using large-scale axial gradient glass // Proc. SPIE. 1996. V. 2863. P. 227–236.
3. Ильинский Р.Е. Аберрации второго порядка градиентных оптических систем с малыми нарушениями осевой симметрии // Опт. и спектр. 1998. Т. 84. № 6. С. 1027–1031.
4. Ильинский Р.Е. Синтез и анализ оптических систем с асферическими поверхностями и градиентными средами // Автореф. канд. дис. М., 1999.
5. Vociort F. Primary aberration coefficients for axial gradient-index lenses // Proc. SPIE. 1999. V. 3737. P. 20–31.
6. Ровенская Т.С., Казаков В.И. Аберрации третьего порядка оптических систем с градиентными элементами // Тр. МВТУ. 1987. № 489. С. 47–56.
7. Поспехов В.Г., Ровенская Т.С., Сушков А.Л. Свойства градианов в области аберрации третьего порядка // Изв. вузов. Приборостроение. 1988. Т. 31. № 12. С. 57–60.
8. Говорухин В., Цибулин Б. Компьютер в математическом исследовании. СПб.: ПИТЕР, 2001. 619 с.
9. GRADIUM Glass Data Book and Materials Safety Data Sheet. Albuquerque: LightPath Technologies, 1999.