

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ДИФРАКЦИОННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ НА АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Е.Г. Ежов

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Аннотация

Приведена методика получения конструктивных параметров исходных схем оптических систем, включающих дифракционные структуры, выполненные на четных асферических поверхностях наиболее общего вида. Эффективность методики продемонстрирована на примерах расчета объектива комбинированного устройства записи и чтения цифровых дисков двух форматов и микрообъектива видеокамеры.

Введение

Серьезные успехи в области формообразования, производства оптических пластмасс и изготовления оптических элементов методами прецизионного литья и штамповки открыли возможность массового тиражировать гибридных линз, одна из асферических поверхностей которой несет рельефно-фазовую кольцевую микроструктуру с пилообразным профилем штриха. Включение в оптическую систему таких гибридных линз, одновременно являющихся силовыми и эффективными коррекционными элементами, позволяет значительно улучшать оптические характеристики системы, развивая ее апертуру и/или поле зрения, а также повышая полихроматическое разрешение в заданном спектральном диапазоне [1]. Это, в свою очередь, требует совершенствования методов проектирования оптических систем с такими элементами.

1. Компоновка схемы и получение исходных конструктивных параметров системы

При проектировании оптической системы на первый план выдвигается задача выбора оптимальной исходной схемы, под которой понимают схему, включающую лишь те элементы, свойства и возможности которых необходимы, а количество достаточно для удовлетворения требований, предъявляемых к разрабатываемой системе [2]. Эта задача, названная М.М. Русиновым композицией оптических систем, не решается ни одной из существующих коммерческих компьютерных программ, предназначенных для расчета и проектирования оптики.

Традиционно разработчики оптических систем komponуют исходную схему, опираясь на собственный опыт и используя при этом разработанный Г.Г. Слюсаревым и основанный на теории aberrаций третьего порядка [3] аппарат основных параметров R , W , C или, исходя из aberrационных свойств отдельных элементов [2]. Однако наиболее результативным считается подход, при котором исходная схема выбирается из архива известных схемных решений [4].

При разработке же систем, состоящих из элементов, позволяющих осуществлять селективную коррекцию aberrаций различных порядков, таких как дифракционные линзы (ДЛ), градиентные или однородные рефракционные линзы (ОРЛ) с асферическими

поверхностями более эффективной представляется методика, предложенная в работах [5, 6] и развиваемая в данной статье. Она включает два основных этапа. На первом этапе, исходя из требований, предъявляемых к оптической системе, и учитывая коррекционные возможности элементов различных типов, выбирается ее конфигурация, т.е. общее число элементов, их тип и взаимное расположение. Затем составляется система параксиальных и компенсационных уравнений, решение которой призвано обеспечить заданные параксиальные характеристики и устранение выбранных хроматических и монохроматических aberrаций нескольких низших порядков малости. Aberrационные коэффициенты при этом получают на основе диаграммы рассеяния псевдолучей, ход которых через оптическую систему рассчитывается в приближении заданного порядка малости [7, 8]. Общее количество конструктивных параметров при выбранной конфигурации может превышать число решаемых уравнений, и тогда значения свободных параметров определяются из условия достижения минимально возможного уровня остаточных aberrаций высших порядков. Поиск набора этих значений включает определение границы начальной зоны поиска, исходя из известных ограничений на значения свободных параметров, выбор шага для каждого из свободных параметров и решение на каждом шаге системы параксиальных и компенсационных уравнений. Результатом этого этапа является база начальных решений.

На втором этапе для каждого из решений выбранной базы при значениях числовой апертуры и полевого угла, близких к требуемым, и оптимальном положении входного зрачка производится расчет хода реальных лучей и вычисляется лучевая функция оценки качества точечного изображения. Затем выделяются решения, для которых значения оценочной функции превышают пороговый уровень. Выделенные решения используются в качестве исходных при последующей лучевой оптимизации. В общем случае, ее осуществляют по положению входного зрачка, коэффициентам радиального градиента всех неоднородных материалов и по полиномиальным коэффициентам ДЛ и асферических поверхностей. При этом оптимизация производится по коэффициентам, влияющим на aberrации, начиная с того порядка малости в aberrационном разложении, который не учитывался при составлении

компенсационных уравнений. Если же результаты оптимизации неудовлетворительны (не получено ожидаемое значение апертуры или полевого угла, какие-то конструктивные параметры системы не приемлемы и т.д.), проводится повторное исследование базы начальных решений с изменением условий отбора. В результате окажутся найденными конструктивные параметры, соответствующие предельным для выбранной конфигурации оптическим характеристикам. В случае если эти характеристики не удовлетворяют условиям решаемой задачи, то следует изменить конфигурацию оптической системы, число ее элементов и/или их взаимное расположение, а затем весь процесс поиска повторить.

Оптимизацию целесообразно осуществлять с помощью любой из оптических САД-систем, позволяющих выполнять трассировку реальных лучей через образующие систему элементы, например, Zemax (ZEMAX Development Corporation) [9] или Code V (Optical Research Associates) [10]. Естественно, что программы, осуществляющие трассировку псевдолучей, в этом случае, должны базироваться на таком же описании элементов, которое заложено в используемом для оптимизации САДе. В связи с этим, ниже остановимся на расчете хода псевдолучей через асферические поверхности раздела сред и дифракционные элементы, базируясь на описании, используемом в пакете Zemax.

2. Расчет хода псевдолучей

Расчет хода псевдолучей в однородных средах, ограниченных четными асферическими поверхностями вида

$$F(\rho, z) = cz - 1 + \sqrt{1 - (c\rho)^2} - \frac{1}{8}\sigma_3(c\rho)^4 - \frac{1}{16}\sigma_5(c\rho)^6 - \dots = 0 \quad (1)$$

(где z - координата точки поверхности, отстоящей от оптической оси на расстояние ρ в системе координат, связанной с вершиной этой поверхности, C - кривизна поверхности в ее вершине, $\sigma_3, \sigma_5, \dots$ - коэффициенты асферической деформации поверхности) и через ДЛ, структура которых размещена на таких поверхностях подробно рассмотрен в работах [11, 12]. Здесь же покажем, как осуществлять расчет хода псевдолучей через четные асферические поверхности наиболее общего вида, используемого, в частности, в Zemax:

$$z = \frac{c\rho^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + \kappa)c^2\rho^2}} + \sum_{i=1}^l \alpha_i \rho^{2i} \quad (2)$$

где κ - параметр эллиптичности, α_i - при $i=1, 2, 3, \dots$ коэффициенты асферической деформации. Речь идет о получении выражений, описывающих точку пересечения псевдолуча, распространяющегося в однородной среде, с асферической поверхностью, а также параметров луча прошедшего

через такую преломляющую или дифрагирующую поверхность.

Ход реального луча будем описывать в декартовой системе координат, ось OZ которой совпадает с оптической осью. Высоту и наклон луча определим с помощью векторов \mathbf{p} и $\mathbf{\varepsilon} = d\mathbf{p}/dz$; при этом вектор \mathbf{p} имеет составляющие $[x(z), y(z), 0]$, а вектор $\mathbf{\varepsilon}$ - составляющие $[\varepsilon_x(z), \varepsilon_y(z), 0]$, где ε_x и ε_y - направляющие тангенсы луча связанные с направляющими косинусами луча соотношениями $\varepsilon_x = \alpha_x/\alpha_z$ и $\varepsilon_y = \alpha_y/\alpha_z$.

При распространении луча между k -ой и $(k+1)$ -ой асферическими поверхностями луч на входе в среду (после преломления на k -ой поверхности) зададим векторами \mathbf{p}_k и $\mathbf{\varepsilon}_k$, а на выходе из среды [в точке падения на $(k+1)$ -ую поверхность, но до преломления на ней] - векторами \mathbf{p}_{k+1} и $\mathbf{\varepsilon}_{k+1}$. Если $z_{k,k+1}$ есть расстояние вдоль оси OZ от точки входа луча в однородную среду до точки его выхода, то очевидно, что векторы $\mathbf{p}_k, \mathbf{\varepsilon}_k$ и $\mathbf{p}_{k+1}, \mathbf{\varepsilon}_{k+1}$ связаны между собой уравнениями

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{p}_{k+1} &= \mathbf{p}_k + z_{k,k+1}\mathbf{\varepsilon}_k, \\ \mathbf{\varepsilon}_{k+1} &= \mathbf{\varepsilon}_k. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Пусть d_k - расстояние между вершинами k -ой и $(k+1)$ -ой поверхностей. Тогда

$$z_{k,k+1} = d_k + z_{k+1} - z_k \quad (4)$$

где z_k - координата точки пересечения луча с k -ой поверхностью в системе координат, связанной с вершиной этой поверхности и, аналогично, z_{k+1} - координата точки пересечения луча с $(k+1)$ -ой поверхностью в системе координат, связанной с вершиной $(k+1)$ -ой поверхности.

Асферическую поверхность, являющуюся границей раздела сред, определим в декартовой системе координат, плоскость XOY которой касается вершины поверхности. В дальнейшем такую систему координат будем называть K -системой. В этой системе координат асферическую поверхность опишем уравнением, полученным путем преобразования (2):

$$F(\rho, z) = z - \frac{c\rho^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + \kappa)c^2\rho^2}} - \sum \alpha_i \rho^{2i} = 0, \quad (5)$$

или

$$\left. \begin{aligned} F(\rho, z) &= z - \frac{1}{(1 + \kappa)c} \left[1 - \sqrt{1 - (1 + \kappa)c^2\rho^2} \right] - \\ &- \sum \alpha_i \rho^{2i} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Тогда координаты z_k и z_{k+1} можно определить из выражений

$$\left. \begin{aligned} z_k &= \frac{1}{(1+\kappa_k)c_k} \left[1 - \sqrt{1 - (1+\kappa_k)(c_k \rho_k)^2} \right] \\ &+ \sum \alpha_i^{(k)} \rho_k^{2i}, \\ z_{k+1} &= \frac{1}{(1+\kappa_{k+1})c_{k+1}} \left[1 - \sqrt{1 - (1+\kappa_{k+1})(c_{k+1} \rho_{k+1})^2} \right] \\ &+ \sum \alpha_i^{(k+1)} \rho_{k+1}^{2i}. \end{aligned} \right\} (7)$$

Уравнения (3), (4) и (7) являются основой для получения формул расчета хода псевдолуча через однородную среду, ограниченную четными асферическими поверхностями наиболее общего вида. Произведя при выводе формул операции, аналогичные описанным в работах [11, 12], для порядковых составляющих расстояния

$$z_{k,k+1} = z_{k,k+1}^{(0)} + z_{k,k+1}^{(2)} + z_{k,k+1}^{(4)} + \dots, \quad (8)$$

получим:

$$\left. \begin{aligned} z_{k,k+1}^{(0)} &= d_k, \\ z_{k,k+1}^{(2)} &= (\beta_{1,k+1} - \beta_{1,k})u^{(2)} + \beta_{1,k+1}d_k(2v^{(2)} + d_k w^{(2)}), \\ z_{k,k+1}^{(4)} &= (\beta_{1,k+1} - \beta_{1,k})u^{(4)} + (\beta_{2,k+1} - \beta_{2,k})[u^{(2)}]^2 + \\ &+ \beta_{1,k+1} \left[d_k(2v^{(4)} + d_k w^{(4)}) + 2z_{k,k+1}^{(2)}(v^{(2)} + d_k w^{(2)}) \right] + \\ &+ \beta_{2,k+1}d_k \left\{ 4d_k[v^{(2)}]^2 + d_k^3[w^{(2)}]^2 + \right. \\ &\left. + 4u^{(2)}v^{(2)} + 2d_k u^{(2)}w^{(2)} + 4d_k^2 v^{(2)}w^{(2)} \right\} \end{aligned} \right\} (9)$$

Здесь параметры $\beta_{i,k}$ и $\beta_{i,k+1}$ (при $i=1,2$), относящиеся к k -ой и $k+1$ -ой поверхностям, вычисляются по общим формулам

$$\beta_1 = \frac{1}{2}c + \alpha_1, \quad \beta_2 = \frac{1}{8}(1+\kappa)c^3 + \alpha_2, \quad (10)$$

а составляющие трех инвариантов вращения

$$\left. \begin{aligned} u &= \rho_k^2 = u^{(2)} + u^{(4)} + \dots, \\ v &= \mathbf{\rho}_k \mathbf{\epsilon}_k = v^{(2)} + v^{(4)} + \dots, \\ w &= \mathbf{\epsilon}_k^2 = w^{(2)} + w^{(4)} + \dots \end{aligned} \right\} (11)$$

имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} u^{(2)} &= [\mathbf{\rho}_k^{(1)}]^2, & u^{(4)} &= 2\mathbf{\rho}_k^{(1)} \mathbf{\rho}_k^{(3)}, \\ v^{(2)} &= \mathbf{\rho}_k^{(1)} \mathbf{\epsilon}_k^{(1)}, & v^{(4)} &= \mathbf{\rho}_k^{(3)} \mathbf{\epsilon}_k^{(1)} + \mathbf{\rho}_k^{(1)} \mathbf{\epsilon}_k^{(3)}, \\ w^{(2)} &= [\mathbf{\epsilon}_k^{(1)}]^2, & w^{(4)} &= 2\mathbf{\epsilon}_k^{(1)} \mathbf{\epsilon}_k^{(3)}. \end{aligned} \right\} (12)$$

Уравнения (9) - (12) позволяют по известным составляющим первого, третьего и пятого порядков малости параметров луча на входе в однородную среду вычислить соответствующие составляющие параметров луча на выходе из нее, т.е. эти уравнения позволяют рассчитать ход псевдолуча пятого порядка через однородную среду, ограниченную

двумя асферическими поверхностями. При этом каждая из этих поверхностей может представлять собой как поверхность оптического элемента, так и любую другую поверхность, например, поверхность предмета или изображения.

Расчет хода псевдолуча через преломляющую или дифрагирующую поверхность сводится к тому, чтобы по известным составляющим различных порядков малости векторов $\mathbf{\rho}$ и $\mathbf{\epsilon}$, характеризующих псевдолуч, падающий на поверхность, разделяющую две среды или несущую дифракционную микроструктуру, найти составляющие различных порядков малости вектора $\mathbf{\epsilon}'$, определяющего направление распространения прошедшего (преломленного или дифрагированного) псевдолуча. Решение этой задачи, основанное на использовании закона Снеллиуса или формулы дифракционной решетки, требует знания в частности, составляющих различных порядков малости нормали к поверхности [7, 8, 11].

Вектор нормали к поверхности, описываемой функцией $F(\rho, z)$, может быть представлен в виде

$$\mathbf{o} = \frac{\nabla F}{\sqrt{(\nabla F)^2}}, \quad (13)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \nabla F &= \mathbf{i} \frac{\partial F}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial F}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial F}{\partial z}, \\ \sqrt{(\nabla F)^2} &= \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2}. \end{aligned} \right\} (14)$$

Произведя дифференцирование выражения (6), введя обозначение

$$A = \frac{c}{\sqrt{1 - (1+\kappa)c^2 \rho^2}} + 2 \sum i \alpha_i \rho^{2(i-1)} \quad (15)$$

и, учитывая, что $\rho^2 = x^2 + y^2$, получим:

$$\frac{\partial F}{\partial x} = -xA, \quad \frac{\partial F}{\partial y} = -yA, \quad \frac{\partial F}{\partial z} = 1. \quad (16)$$

Отсюда

$$\sqrt{(\nabla F)^2} = \sqrt{1 + \rho^2 A^2}. \quad (17)$$

Таким образом, составляющие вектора нормали будут иметь вид:

$$o_x = -xAo_z, \quad o_y = -yAo_z, \quad o_z = 1/\sqrt{1 + \rho^2 A^2}. \quad (18)$$

Для того чтобы получить порядковые составляющие вектора нормали, разложим в ряд радикал $\sqrt{1 - (1+\kappa)c^2 \rho^2}$ и, подставив результат в (6), запишем

$$F(\rho, z) = z - \beta_1 \rho^2 - \beta_2 \rho^4 - \beta_3 \rho^6 - \dots, \quad (19)$$

где β_1 и β_2 вычисляются по формулам (10), а

$$\beta_3 = \frac{1}{16}(1+\kappa)^2 c^5 + \alpha_3. \quad (20)$$

Дифференцируя уравнение (19), получим:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial x} &= -2x(\beta_1 + 2\beta_2\rho^2 + 3\beta_3\rho^4 + \dots) \\ \frac{\partial F}{\partial y} &= -2y(\beta_1 + 2\beta_2\rho^2 + 3\beta_3\rho^4 + \dots) \\ \frac{\partial F}{\partial z} &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \Lambda &= \beta_1 + 2\beta_2\rho^2 + 3\beta_3\rho^4 = \beta_1 + 2\beta_2(u^{(2)} + u^{(4)}) + \\ &+ 3\beta_3(u^{(2)})^2 + \dots, \end{aligned} \quad (22)$$

запишем Λ в виде суммы слагаемых различных порядков малости

$$\Lambda = \Lambda^{(0)} + \Lambda^{(2)} + \Lambda^{(4)} + \dots, \quad (23)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \Lambda^{(0)} &= \beta_1, \\ \Lambda^{(2)} &= 2\beta_2u^{(2)}, \\ \Lambda^{(4)} &= 2\beta_2u^{(4)} + 3\beta_3(u^{(2)})^2. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Подставляя новую переменную в (17), получим

$$\sqrt{(\nabla F)^2} = \sqrt{1 + 4\rho^2\Lambda^2}, \quad (25)$$

откуда

$$\begin{aligned} o_z &= \frac{1}{\sqrt{1 + 4\rho^2\Lambda^2}} = 1 - 2(u^{(2)} + u^{(4)}) \times \\ &\times \left[(\Lambda^{(0)})^2 + 2\Lambda^{(0)}\Lambda^{(2)} \right] + 6(u^{(2)})^2 (\Lambda^{(0)})^4. \end{aligned} \quad (26)$$

Порядковые составляющие o_z имеют вид

$$\left. \begin{aligned} o_z^{(0)} &= 1, \\ o_z^{(2)} &= -2u^{(2)}(\Lambda^{(0)})^2, \\ o_z^{(4)} &= -4u^{(2)}\Lambda^{(0)}\Lambda^{(2)} - 2u^{(4)}(\Lambda^{(0)})^2 + 6(u^{(2)})^2(\Lambda^{(0)})^4. \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

Учитывая, что

$$\rho_{k+1} = \rho_{k+1}^{(1)} + \rho_{k+1}^{(3)} + \rho_{k+1}^{(5)} + \dots \quad (28)$$

из выражений (17) и (22) следует

$$\begin{aligned} o_x &= -2x\Lambda o_z = -2(x^{(1)} + x^{(3)} + x^{(5)}) \times \\ &\times (\Lambda^{(0)} + \Lambda^{(2)} + \Lambda^{(4)})(1 + o_z^{(2)} + o_z^{(4)}) = \\ &-2 \left[\begin{aligned} &(x^{(1)}\Lambda^{(0)} + x^{(1)}\Lambda^{(2)} + x^{(1)}\Lambda^{(4)} + x^{(3)}\Lambda^{(0)} + \\ &+ x^{(3)}\Lambda^{(2)} + x^{(5)}\Lambda^{(0)}) \times \\ &\times (1 + o_z^{(2)} + o_z^{(4)}) \end{aligned} \right] + \dots \end{aligned} \quad (29)$$

В результате порядковые составляющие o_x

имеют вид

$$\left. \begin{aligned} o_x^{(1)} &= -2x^{(1)}\Lambda^{(0)}, \\ o_x^{(3)} &= -2(x^{(1)}\Lambda^{(0)}o_z^{(2)} + x^{(1)}\Lambda^{(2)} + x^{(3)}\Lambda^{(0)}), \\ o_x^{(5)} &= -2 \left(\begin{aligned} &x^{(1)}\Lambda^{(0)}o_z^{(4)} + x^{(1)}\Lambda^{(2)}o_z^{(2)} + x^{(1)}\Lambda^{(4)} + \\ &+ x^{(3)}\Lambda^{(0)}o_z^{(2)} + x^{(3)}\Lambda^{(2)} + x^{(5)}\Lambda^{(0)} \end{aligned} \right) \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

Аналогичную форму имеют и составляющие o_y .

Далее, используя закон Снеллиуса, и преобразования, подобные приведенным в работах [11, 12], для связи порядковых составляющих падающего

$$\varepsilon_x = \varepsilon_x^{(1)} + \varepsilon_x^{(3)} + \varepsilon_x^{(5)} + \dots \quad (31)$$

и преломленного псевдолучей

$$\varepsilon'_x = \varepsilon'_x^{(1)} + \varepsilon'_x^{(3)} + \varepsilon'_x^{(5)} + \dots, \quad (32)$$

получим

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon'_x^{(1)} &= \alpha'_x^{(1)}, \\ \varepsilon'_x^{(3)} &= \alpha'_x^{(1)}\gamma^{(2)} + \alpha'_x^{(3)}, \\ \varepsilon'_x^{(5)} &= \alpha'_x^{(1)}\gamma^{(4)} + \alpha'_x^{(3)}\gamma^{(2)} + \alpha'_x^{(5)}. \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

Здесь

$$\left. \begin{aligned} \alpha_x^{(1)} &= \varepsilon_x^{(1)}, \\ \alpha_x^{(3)} &= \varepsilon_x^{(3)} - \frac{1}{2}\varepsilon_x^{(1)}e_1^{(2)}, \\ \alpha_x^{(5)} &= \varepsilon_x^{(5)} - \frac{1}{2}\varepsilon_x^{(3)}e_1^{(2)} + \frac{1}{2}\varepsilon_x^{(1)} \left[\frac{3}{4}[e_1^{(2)}]^2 - e_1^{(4)} \right], \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

а $e_1^{(2)}$ и $e_1^{(4)}$ составляющие инварианта вращения $e_1 = x^2 + y^2$.

Порядковые составляющие величины

$$\gamma = \frac{1}{\alpha'_z} = 1 + \gamma^{(2)} + \gamma^{(4)} + \dots, \quad (35)$$

входящие в уравнение (33), вычисляются по формулам

$$\left. \begin{aligned} \gamma^{(2)} &= -\alpha'_z{}^{(2)}, \\ \gamma^{(4)} &= [\alpha'_z{}^{(2)}]^2 - \alpha'_z{}^{(4)}, \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \alpha'_z{}^{(2)} &= \nu\alpha_z^{(2)} + \chi^{(0)}o_z^{(2)} + \chi^{(2)}, \\ \alpha'_z{}^{(4)} &= \nu\alpha_z^{(4)} + \chi^{(0)}o_z^{(4)} + \chi^{(2)}o_z^{(2)} + \chi^{(4)}, \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

$$\nu = n/n', \quad (38)$$

$$\left. \begin{aligned} \chi^{(0)} &= 1 - \nu^{(0)}, \\ \chi^{(2)} &= -\nu\Xi^{(2)}\chi^{(0)}, \\ \chi^{(4)} &= -\nu\chi^{(0)} \left[\Xi^{(4)} - \frac{1}{2}\nu(1+\nu)[\Xi^{(2)}]^2 \right], \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

$$\left. \begin{aligned} \Xi^{(2)} &= o_x^{(1)}\alpha_x^{(1)} + o_y^{(1)}\alpha_y^{(1)} + \alpha_z^{(2)} + o_z^{(2)}, \\ \Xi^{(4)} &= o_x^{(3)}\alpha_x^{(1)} + o_x^{(1)}\alpha_x^{(3)} + o_y^{(3)}\alpha_y^{(1)} + \\ &+ o_y^{(1)}\alpha_y^{(3)} + o_z^{(2)}\alpha_z^{(2)} + \alpha_z^{(4)} + o_z^{(4)}. \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

Аналогичную форму имеют и составляющие ε'_y .

Таким образом, задача нахождения составляющих различных порядков малости вектора $\mathbf{\epsilon}'$ определяющего направление распространения преломленного асферической поверхностью псевдолоуча пятого порядка полностью решена.

Рассмотрим теперь, как можно использовать вышеприведенные соотношения для расчета хода псевдолоуча через структуру ДЛ, размещенную на асферической поверхности. В ряде программных продуктов, осуществляющих расчет хода лучей через оптические системы, включающие ДЛ (в том числе, в Zemax), их рассматривают как бесконечно тонкие поверхности, вносящие в падающий на них волновой фронт фазовую добавку

$$\varphi = \sum_{i=1}^l A_i \rho^{2i}. \quad (41)$$

В этом случае, как показано в [13], пространственная частота и направляющие косинусы падающего и дифрагированного лучей связаны соотношениями

$$\Omega(\rho) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi}{d\rho}, \quad (42)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_x^{(m)} &= \alpha_x + \frac{m\lambda}{2\pi} \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \\ \alpha_y^{(m)} &= \alpha_y + \frac{m\lambda}{2\pi} \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \end{aligned} \right\} \quad (43)$$

где λ – рабочая длина волны, а m – номер порядка дифракции. При описании структуры ДЛ через фазовую добавку (41) ее фокусное расстояние определяется коэффициентом A_1 :

$$f' = -\frac{\pi}{A_1 \lambda m}, \quad (44)$$

а коэффициенты A_i при $i = 2, 3, \dots$ являются коэффициентами асферических добавок.

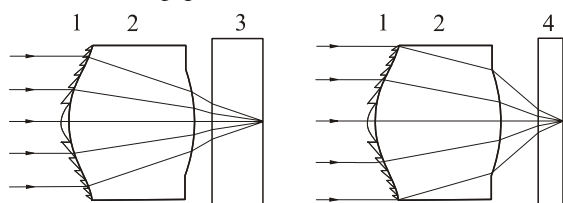


Рис. 1. CD/DVD система объектив – цифровой диск:

1 – ДЛ, размещенная на передней асферической поверхности ОРЛ (2); 3 – CD диск; 4 – DVD диск

Выражения (43) описывают дифракцию на структуре ДЛ в локальной \tilde{K} –системе координат, с направляющими векторами $\tilde{\mathbf{i}}, \tilde{\mathbf{j}}, \tilde{\mathbf{k}}$, началом координат в точке падения луча на асферическую поверхность и осью $O\tilde{Z}$, совпадающей с нормалью \mathbf{o} к поверхности в этой точке. Перейти от этой системы координат к K –системе, имеющей направляющие векторы $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ и связанной с вершиной поверхности нетрудно обратившись к работам [11, 12].

Затем, воспользовавшись результатами этих же работ, можно получить составляющие различных порядков малости искомого вектора $\mathbf{\epsilon}'$, определяющего наклон дифрагированного структурой ДЛ луча.

3. Оптические системы с ДЛ на асферической поверхности

В работе [14] приведены конструктивные параметры и оптические характеристики разработанного автором рефракционно-дифракционного объектива комбинированного устройства записи и чтения цифровых дисков форматов CD и DVD. Перенос в этом объективе дифракционной структуры с плоскопараллельной подложки на переднюю асферическую поверхность ОРЛ, пересчет исходной схемы по псевдолоучевой методике и последующая оптимизация с использованием САД-программы Zemax позволили упростить конструкцию и снизить массу объектива, не ухудшая качество фокусировки. Оптическая схема системы представлена на рис. 1, а конструктивные параметры исходного решения и значения оптимизирующих полиномиальных коэффициентов $A_4 - A_8, \alpha_4^{(1)} - \alpha_8^{(1)}, \alpha_4^{(2)} - \alpha_8^{(2)}$ – в таблицах 1 и 2, соответственно.

Система обеспечивает на длине волны CD-формата $\lambda_1 = 0,78$ мкм при числовой апертуре $A' = 0,51$, а также на длине волны DVD-формата $\lambda_2 = 0,65$ мкм при $A' = 0,65$ дифракционно-ограниченную фокусировку в пределах полевого угла $2\omega \leq 1,4^\circ$. Максимальный световой диаметр линз объектива $D_{св} = 3,04$ мм. Интенсивность Штреля в сфокусированном пятне не ниже 0,95, а доля энергии в пределах диска Эйри свыше 83%.

Если при проектировании объектива комбинированного устройства записи и чтения цифровых дисков двух форматов ввиду малого полевого угла и благодаря наличию автофокусировки требуется лишь устранение комы и подавление сферохроматизма, то фотообъективы и, в частности, микрообъективы мобильных телефонов или видеокамер наблюдения, работающие в видимом спектральном диапазоне, требуют, прежде всего, устранения хроматизма положения и увеличения, а затем и сферохроматизма.

Если к тому же учесть, что такие объективы должны формировать плоское изображение в широком поле зрения с высоким разрешением при низкой дисторсии то ясно, что параллельно требуется минимизация всех монохроматических аберраций. Используя совместно предложенную в работе [15] параксиальную методику апохроматизации оптических систем с помощью дифракционно-рефракционных корректоров и изложенную выше псевдолоучевую методику, была получена исходная схема микрообъектива, состоящего из трех ОРЛ с асферическими поверхностями, у которого на заднюю поверхность первой ОРЛ нанесена рельефно-фазовая дифракционная структура.

Таблица 1.

Конструктивные параметры исходной схемы системы объектив – диск форматов CD/DVD

$r, \text{мм}^{-1}$	$d_{\lambda 1} / d_{\lambda 2}, \text{мм}$	$n_{\lambda 1} / n_{\lambda 2}$	$\alpha_2 \cdot 10^2, \text{мм}^{-3}$	$\alpha_3 \cdot 10^2, \text{мм}^{-5}$
2,2222*			-2,3175	-0,8678
	2,5	1,5735 / 1,5803		
-2,2222			5,6280	-7,9895
	0,5 / 0,8923			
0				
	1,2 / 0,6	1,5735 / 1,5803		
0				
$s'_F = 0, f'_{\lambda 1} = 2,334 \text{ мм}, f'_{\lambda 2} = 2,328 \text{ мм}$				
* $A_1 = -124,0151 \text{ мм}^{-2}, A_2 = -50,6478 \text{ мм}^{-4}, A_3 = -30,3627 \text{ мм}^{-6}$				

Таблица 2.

Оптимизирующие конструктивные параметры системы объектив – диск форматов CD/DVD

Тип коэффициента	Значения полиномиальных коэффициентов с номерами $i = 4 \dots 8$				
	4	5	6	7	8
A_i	$27,4803 \text{ мм}^{-8}$	$5,1218 \text{ мм}^{-10}$	$-29,3343 \text{ мм}^{-12}$	$17,5824 \text{ мм}^{-14}$	$-3,1397 \text{ мм}^{-16}$
$\alpha_i^{(1)} \cdot 10^4$	$9,007 \text{ мм}^{-7}$	$33,8485 \text{ мм}^{-9}$	$-68,5371 \text{ мм}^{-11}$	$38,4375 \text{ мм}^{-13}$	$-7,1092 \text{ мм}^{-15}$
$\alpha_i^{(2)} \cdot 10^4$	$1083,04 \text{ мм}^{-7}$	$-942,56 \text{ мм}^{-9}$	$471,75 \text{ мм}^{-11}$	$-124,48 \text{ мм}^{-13}$	$13,4746 \text{ мм}^{-15}$

Оптимизация исходной схемы с использованием САД-программы Zemax позволила получить дисторсирующий план-апохромат, который при относительном отверстии 1:2,4 обеспечивает разрешение 98 мм^{-1} при контрасте не ниже 0,5 в пределах полевого угла $2\omega \leq 60^\circ$. Остаточный хроматизм положения в диапазоне от $\lambda_{\min} = \lambda_F = 0,48613 \text{ мкм}$ до $\lambda_{\max} = \lambda_C = 0,65626 \text{ мкм}$ не превышает 7,5 мкм, а дисторсия - <0,5%.

Оптическая схема объектива представлена на рис. 2, а конструктивные параметры - в табл. 3, соответственно.

Заключение

Приведенная в настоящей статье методика, базирующаяся на трассировке псевдолучей, позволяет получать конструктивные параметры исходных схем оптических систем, включающих дифракцион-

ные структуры, выполненные на четных асферических поверхностях наиболее общего вида. Включение в оптическую систему рефракционных линз с размещенной на асферической поверхности дифракционной структурой, позволяет упростить конструкцию системы и, скорректировав как хроматические, так и монохроматические aberrации, улучшить основные характеристики системы.

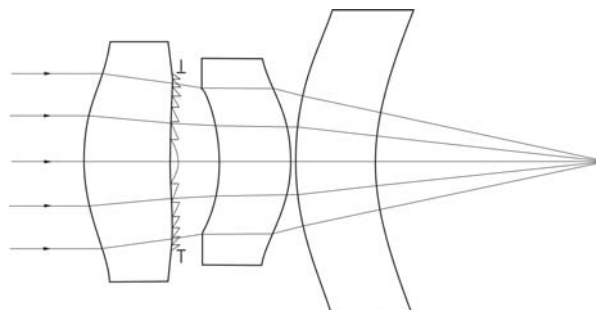


Рис. 2. Принципиальная оптическая схема объектива

Таблица 3.
Конструктивные параметры микрообъектива

r , мм	d , мм	Среда	$\alpha_2 \cdot 10^2$, мм ⁻³	$\alpha_3 \cdot 10^2$, мм ⁻⁵	$\alpha_4 \cdot 10^2$, мм ⁻⁷	$\alpha_5 \cdot 10^2$, мм ⁻⁹
1,7319			-2,2695	-3,5615	0,2676	-2,7021
	0,76	ПММА				
3,9729*			-6,1431	-16,0129	-3,5652	8,5846
	0,4425					
-1,6791			2,1514	-21,8536	17,5853	10,6459
	0,6365	ПММА				
-1,3310			5,3303	3,6462	4,1340	6,7561
	0,05					
2,0066			-14,6056	8,4726	-2,5418	0,4269
	0,70	ПММА				
1,5455			-18,7189	5,7059	-1,7250	0,0791
$s' = 2,056$ мм, $f' = 3,712$ мм						
* $A_1 = -107$ мм ⁻² , $A_2 = 43,9432$ мм ⁻⁴ , $A_3 = -493,716$ мм ⁻⁶ , $A_4 = 2909,23$ мм ⁻⁸ , $A_5 = -7311,63$ мм ⁻¹⁰ , $A_6 = 8711,57$ мм ⁻¹² , $A_7 = -4461,27$ мм ⁻¹⁴ , $A_8 = 551,757$ мм ⁻¹⁶						

Литература

1. <http://waytech.co.kr>
2. Русинов М.М. Композиция оптических систем // Л.: Машиностроение, 1989. - 383 с.
3. Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем // Л.: Машиностроение, 1969. - 672 с.
4. Бездидько С.Н. Некоторые методы определения предельно возможного качества оптических систем различной сложности, используя базы данных оптических систем // Сб. трудов VI Международной конференции «Прикладная оптика». Том 3: «Компьютерные технологии в оптике». – СПб, 2004. – С. 3-11.
5. Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Степанов С.А. Композиция и расчет высокоразрешающих оптических систем с градиентными и дифракционными элементами // Компьютерная оптика. - Самара, ИСОИ РАН, 2000. – Вып. 20. - С. 20-24.
6. Ежов Е.Г. Расчет рефракционно-дифракционных объектов комбинированных устройств чтения/записи оптических дисков нескольких форматов // Труды Оптического общества имени Д. С. Рождественского. VII Международной конференции «Прикладная оптика - 2006», – СПб.: 2006. – Т. 3. С. 269–273.
7. Грейсух Г.И., Ефименко И.М., Степанов С.А. Оптика градиентных и дифракционных элементов // М.: Радио и связь, 1990. - 136 с.
8. Greisukh G.I., Bobrov S.T., Stepanov S.A. Optics of diffractive and gradient-index elements and systems. - Bellingham: SPIE Press, 1997. - 414 p.
9. <http://www.zemax.com/zemax/index.html>
10. http://www.opticalres.com/cv/cvprodds_f.html
11. Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Степанов С.А. Расчет хода псевдодулей через оптические системы, включающие дифракционные линзы, структура которых выполнена на асферической поверхности // Компьютерная оптика. - Самара, ИСОИ РАН, 2001. – Вып. 21. - С. 70-72.
12. Ежов Е.Г. Расчет и моделирование высокоразрешающих градиентных и дифракционно-градиентных объектов: Автореф. дис. канд. физ.- мат. наук. – Самара, 2001. – 16 с.
13. Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Степанов С.А. Сравнительный анализ хроматизма дифракционных и рефракционных линз // Компьютерная оптика. - Самара, ИСОИ РАН, 2005. – Вып. 28. - С. 60-65.
14. Ezhov E.G. Design of combined pick-up optical heads // Applied Optics. – 2006. – Vol. 45, № 31. – P. 8040-8043.
15. Greisukh G.I., Ezhov E.G., Stepanov S.A. Diffractive-Refractive Hybrid Corrector for Achromatic Corrections of Optical Systems // Applied Optics. – 2006. – Vol. 45, № 24. – P. 6137–6141.
16. Ежов Е.Г. Грейсух Г.И., Степанов С.А. Расчет комбинированных... // Компьютерная оптика. - Самара, ИСОИ РАН, 2005. №27. С. 28-31.