

## МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЕПРОДУКЦИОННЫХ ГИБРИДНЫХ ОБЪЕКТИВОВ-МОНОХРОМАТОВ С ГРАДИЕНТНЫМИ И ДИФРАКЦИОННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Объективы, предназначенные для репродукции, работают при увеличениях, не очень далеких от минус единицы. Поэтому при их построении используется, как правило, симметричная схема. Объективы, построенные по этой схеме, состоят из двух одинаковых половин, симметрично расположенных относительно материальной диафрагмы. При увеличении  $\beta = -1$  предмет и изображение находятся в фокальных плоскостях соответствующих половин объектива, а промежуточное изображение в пространстве между этими половинами — в бесконечности. В этом случае у объектива автоматически устраняются все нечетные aberrации (такие, как хроматизм положения, кома и дисторсия), а четные поперечные aberrации в плоскости изображения равны удвоенным aberrациям второй половины объектива. В результате aberrационный расчет симметричного объектива, работающего с единичным увеличением, сводится к расчету одной его половины при бесконечно удаленной для нее плоскости предмета и входном зрачке, совпадающем с апертурной диафрагмой объектива.

В работе рассматривается машинно-графическое проектирование симметричного объектива, в котором в качестве силового компонента каждой из его половин используется одиночная градиентная линза. При этом предполагается, что распределение показателя преломления линзы описывается рядом

$$n(\zeta) = \sum_{j=0}^{\infty} n_j \zeta^j,$$

где

$n_j$  — коэффициенты разложения функции показателя преломления;  
 $\zeta$  — квадрат расстояния от оптической оси.

Используя выражения для монохроматических aberrаций третьего порядка, полученные в [1], нетрудно показать, что у одиночной градиентной линзы могут быть одновременно устранены сферическая и все четные по-

вые aberrации. Однако достичь при этом приемлемого уровня остаточных четных полевых aberrаций высших порядков не удается.

Ситуация существенно изменяется, если отказаться от требования устранения составляющих сферической aberrации во всех порядках aberrационного разложения. В этом случае сферическую aberrацию симметричного объектива в целом можно устранить, поместив в плоскость апертурной диафрагмы дифракционную асферику, то есть дифракционный оптический элемент, имеющий нулевую оптическую силу и заданную сферическую aberrацию.

Задача устранения четных полевых aberrаций одиночной градиентной линзы в приближении aberrаций не выше пятого порядка сводится к обнулению двух aberrационных коэффициентов третьего порядка (астигматизма  $B_3$  и кривизны Петцваля  $B_4$ ) и пяти коэффициентов пятого порядка (коэффициентов наклонной сферической aberrации  $M_{2110}$ ,  $M_{2002} = N_{2101}$ , астигматизма  $N_{2011}$  и кривизны поля  $M_{2020}$ ). Число конструктивных параметров при заданной оптической силе градиентной линзы, влияющих на перечисленные aberrации, равно числу независимых aberrационных коэффициентов. Следовательно, может быть поставлена задача одновременного устранения всех четных полевых aberrаций в третьем и пятом порядках.

Эта задача решалась следующим образом. Задавшись некоторыми значениями коэффициентов разложения функции показателя преломления  $n_0$ ,  $n_1$  и толщины линзы  $d$ , аналитически решалась система двух уравнений, обеспечивающих заданное фокусное расстояние  $f'$  и выполнение условия Петцваля ( $B_4 = 0$ ). Из этой системы определялись кривизны поверхностей  $C_1 = C_2$ . Затем при заданных и вычисленных значениях параметров и некотором начальном положении апертурной диафрагмы  $t$  из условия устранения астигматизма третьего и пятого порядков определялись последовательно коэффи-

циенты  $n_2$  и  $n_3$ . Далее, используя уже найденные значения параметров, вычислялся коэффициент  $M_{2002}$  и организовывался итерационный процесс его обнуления путем изменения положения апертурной диафрагмы.

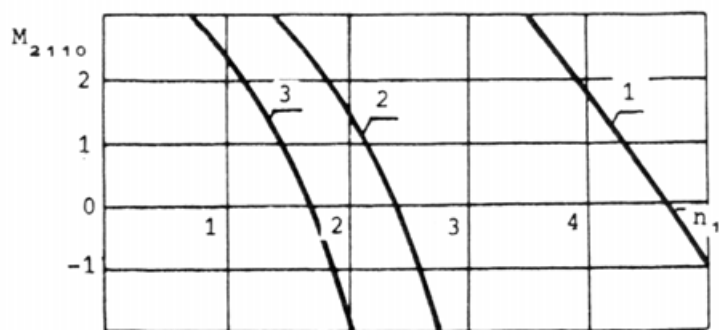
Аберрационные коэффициенты градиентной линзы вычислялись с использованием методики, изложенной в [2] и основанной на машинном расчете хода псевдолучей, траектория которых вычисляется в приближении аберраций различных порядков.

Описанный выше цикл вычислений повторялся при заданных  $n_0$  и  $f'$  для ряда значений  $n_1$  и  $d$  с целью получения функциональной зависимости от этих параметров двух оставшихся необнуленными коэффициентов  $M_{2110}$  и  $M_{2020}$ . Графики зависимостей этих коэффициентов от  $n_1$  для различных значений  $d$  при  $n_0=1,7$ ,  $f'=1$  представлены на рисунках 1а, 1б. Из них видно, что, по крайней мере, отдельно каждый из аберрационных коэффициентов  $M_{2110}$  и  $M_{2020}$  может быть обращен в нуль. Для того чтобы решить вопрос об их совместном обнулении, на основе графиков (рисунки 1а, 1б) строилось семейство кривых

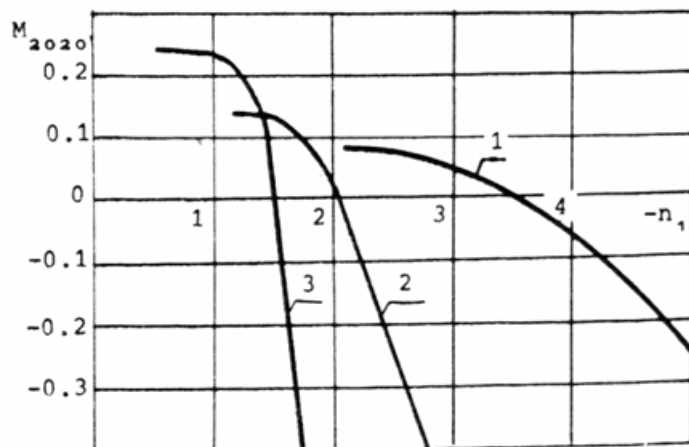
$M_{2110} = f(M_{2020})$  при изменении  $n_1$  и фиксированных значениях  $d$  (рис. 2). Анализ этих кривых показывает, что при изменении толщины градиентной линзы  $d$  уменьшение по модулю одного из аберрационных коэффициентов сопровождается ростом другого. Изменить же характер взаимозависимости аберрационных коэффициентов путем перехода к существенно меньшим либо существенно большим толщинам не представляется возможным.

Это связано с тем, что при уменьшении толщины резко растут значения кривизн преломляющих поверхностей линзы и перепада ее показателя преломления. Сверху же толщина градиентной линзы ограничена возможностью обращения в нуль аберрационных коэффициентов  $B_4$ ,  $M_{2002} = M_{2101}$ . Это граничное значение толщины зависит от показателя преломления градиентной линзы на ее оси  $n_0$  (рис. 3). Таким образом, у одиночной градиентной линзы, свободной от четных полевых аберраций третьего порядка, возможно одновременное устранение трех из четырех различных четных полевых аберраций пятого порядка.

В этих условиях при компоновке симметричного объектива из двух градиентных линз и дифракционной асфе-



а



б

Рис. 1. Зависимости коэффициентов наклонной сферической аберрации  $M_{2110}$  (а) и кривизны поля пятого порядка  $M_{2020}$  (б) от коэффициента разложения показателя преломления  $n_1$  для ряда значений толщины градиентной линзы:

1 -  $d=0,2$ ; 2 -  $d=0,4$ ; 3 -  $d=0,6$

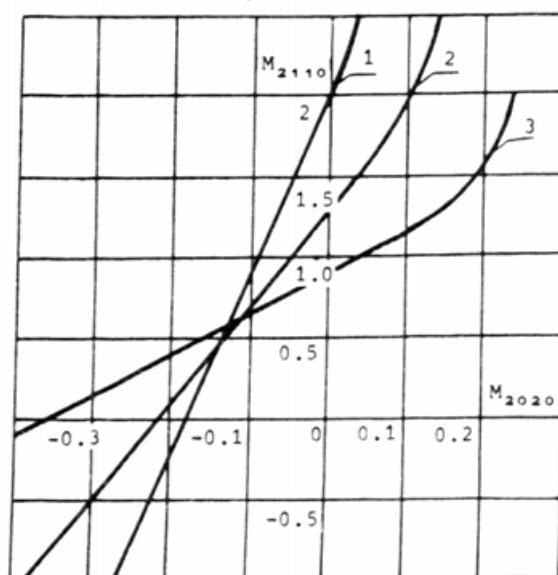


Рис. 2. Взаимные зависимости коэффициентом  $M_{2110}$  и  $M_{2020}$  для ряда значений  $d$ :

1 -  $d=0,2$ ; 2 -  $d=0,4$ ;  
3 -  $d=0,6$

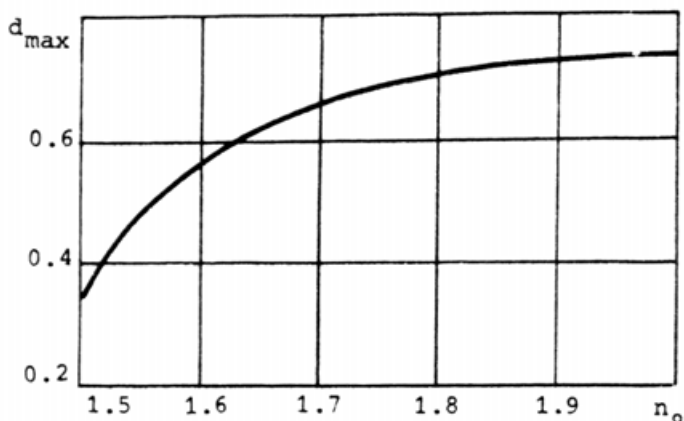


Рис. 3. Зависимость максимальной толщины градиентной линзы  $d_{\max}$  (при которой возможно выполнение условия  $V_4 = M_{2002} = N_{2101} = 0$ ) от показателя преломления на ее оси  $n_0$

рики целесообразно устранить все aberrации, за исключением кривизны поля, что в приближении aberrаций пятого порядка обеспечит формирова-

ние стигматического изображения на некоторой поверхности вращения. При проекции изображения на плоскость поле высококачественного изображения будет ограничено. Его можно расширить, отступив от выполнения условия Петцваля и оптимально сбалансировав кривизну поля третьего и пятого порядков.

В результате полученный гибридный объектив, состоящий из дифракционного и двух градиентных элементов, по степени компенсации монохроматических aberrаций не уступает десятилинзовому объективу типа Фотон-3 [3] и занимает промежуточное положение между двух- и трехлинзовыми дифракционными объективами [4]. При этом в отличие от последних, благодаря низкой пространственной частоте единственного дифракционного элемента, гибридный объектив может иметь светопропускание на уровне обычного объектива, а его хроматизм позволяет использовать излучение газоразрядных приборов, например, типа ртутной лампы.

#### Л и т е р а т у р а

1. S a n d s P.J. Third-order aberrations of inhomogeneous lenses. - J. Opt. Soc. Am., 1970, b. 60, N 11, p. 1436-1443.
2. Г р е й с у х Г.И., С т е п а н о в С.А. Методика aberrационного расчета оптических систем, включающих градиентные и дифракционные элементы // Тез. докл. Всесоюзной конференции "Теоретическая и прикладная оптика". Л., 1984, с. 266-267.
3. Вычислительная оптика: Справочник / М.М. Русинов, А.П. Грамматин, П.Д. Иванов и др. Л.: Машиностроение, 1984, 423 с.
4. Б о б р о в С.Т., Г р е й с у х Г.И., Т у р к е в и ч Ю.Г. Оптика дифракционных элементов и систем. Л.: Машиностроение, 1986, 223 с.