

Формный объектив простой конструкции, имеющий значительно меньшее число компонентов при сопоставимом качестве изображения и светопропускания, чем известные рефракционные аналоги.

Авторы выражают благодарность В. П. Петрову, А. Г. Полецуку, А. М. Щербаченко за помощь в проведении исследований, В. П. Коронкевичу за постоянный интерес и помощь в работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Солдатенков И. С., Соскин С. И. Однокомпонентный объектив с линейным многоуровневым корректором аберраций: Сб. трудов IV Всесоюз. конф. по голографии.— Ереван: АН Арм. ССР, 1982.
2. Левин В. Я., Соскин С. И. Монохроматическая функция рассеяния точки киноформного объектива.— Опт. и спектр., 1984, т. 56, вып. 1, с. 160.
3. Левин В. Я. и др. Изготовление и исследование фазовых масок для устройств хранения и обработки информации.— ОМП, 1978, № 3, с. 43.
4. Левин В. Я., Соскин С. И. Аберрационные свойства объектива с киноформным корректором: Сб. научн. трудов ИАиЭ СО АН СССР.— Новосибирск, 1981, с. 93.
5. Слюсарев Г. Г. Методы расчета оптических систем.— Л.: Машиностроение, 1978.
6. Offner A.— JOSA, 1966, v. 56, p. 1509.
7. Кирьянов В. П. и др. Синтез киноформных оптических элементов.— В кн.: Тез. докл. на III Всесоюз. конф. «Оптика лазеров». Л., 1981, с. 442.
8. Ведерников В. М. и др. Прецизионный фотопостроитель для синтеза оптических элементов.— Новосибирск, 1980. (Препринт/АН СССР, Сиб. отд-ние, ИАиЭ; 93).

*Поступила в редакцию 17 июня 1985 г.*

УДК 535.317.2

**С. Т. БОБРОВ**

*(Ленинград)*

### КОМПЕНСИРОВАННЫЕ СФЕРИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Известно, что дифракционные линзы (ДЛ) обладают некоторыми преимуществами по сравнению с рефракционными в отношении коррекции монохроматических аберраций и на их основе можно создавать высокопропускающие объективы простой конструкции (см., например, [1]). Однако системы, содержащие оптически сильные ДЛ, формируют изображение пониженного контраста вследствие сравнительно малой эффективности (40%) дифракционных элементов. Кроме того, в этих системах невозможна хроматическая коррекция, и допустимая ширина спектра освещения, как правило, может быть обеспечена только лазерным источником. Представляется целесообразным использовать ДЛ в комбинированных объективах, содержащих также и рефракционные компоненты, причем таким образом, чтобы последние являлись силовыми, тогда как ДЛ имели бы небольшую оптическую силу и выполняли корректирующие функции. В этом случае, во-первых, возможна хроматическая коррекция [2], во-вторых, значительно увеличение контраста изображения, поскольку оптически слабые ДЛ имеют малую частоту структуры и могут быть изготовлены с эффективностью 80—90% [3]. В настоящее время, однако, неизвестно фактически ни одного приема компоновки объективов указанного типа, который бы обеспечил хорошую компенсацию полевых аберраций. В работах [4, 5] рассмотрены некоторые комбинированные системы, но во всех случаях силовым элементом является ДЛ, а рефракционные компоненты играют роль корректоров, что не позволяет избавиться от перечисленных выше недостатков чисто дифракционных объективов.

Создать рефракционно-дифракционный компонент с хорошими аберрационными качествами при минимальной частоте структуры ДЛ оказы-

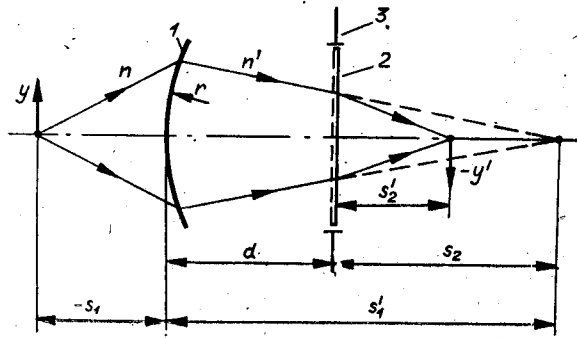


Рис. 1. Комбинированный оптический компонент СПП-ДЛ: 1 — преломляющая поверхность; 2 — ДЛ с фокусным расстоянием  $f = (1/s_2' - 1/s_2)^{-1}$ ; 3 — апертурная диафрагма.

вается возможным, если использовать свойства известных в оптике изопланатических преломляющих поверхностей [6]. Последние характеризуются тем, что расположены относительно апертурной диафрагмы системы таким образом, что их выходной зрачок находится в плоскости, проходящей через центр кривизны поверхности. В итоге изопланатическая поверхность оказывается свободной от первичных комы и астигматизма независимо от расположения предмета и формируемого изображения. Если теперь в плоскости центра поверхности поместить дифракционную асферику, т. е. ДЛ без оптической силы, которая скомпенсирует сферическую aberrацию, т. е. ДЛ без оптической силы, которая скомпенсирует сферическую aberrацию, кроме кривизны поля и дисторсии, причем уже независимо от положения зрачка.

Рассмотрим теперь сочетание сферической преломляющей поверхности (СПП) и ДЛ в общем случае, не задаваясь никакими предварительными условиями относительно фокусного расстояния ДЛ  $f$  и расстояния между вершиной СПП и ДЛ  $d$  (рис. 1). Требуя одновременной компенсации в описанном компоненте первичных комы и астигматизма, приходим к уравнению

$$\frac{S_3}{(s_1' - r)^4} (d - r) \left[ (s_1' - r)^3 - 2(s_1' - r)^2(d - r) - \frac{S_3}{n'} (d - r)^3 (s_1' - d)^3 \right] = 0, \quad (1)$$

где  $S_3$  — коэффициент сферической aberrации СПП, равный

$$S_3 = - \frac{n's_1'(s_1' - r)^2}{r^2(s_1' - d)^4} \left( 1 - \frac{n's_1'}{ns_1} \right); \quad (2)$$

$r$  — радиус СПП;  $s_1, s_1'$  — передний и задний отрезки СПП;  $n$  и  $n'$  — показатели преломления до и после поверхности.

Нетрудно видеть, что условие (1) выполняется, во-первых, если  $S_3/(s_1' - r)^4 = 0$ , т. е. когда преломляющая поверхность является апланатической, кроме случая СПП, концентричной изображению. Дальнейший анализ показывает, что апланатическая поверхность не требует никакого дифракционного компенсатора, поскольку свободна от сферической aberrации, но увеличение компонента при этом фиксировано. Во-вторых, условие (1) выполняется, если  $d = r$ , что приводит к рассмотренному предварительное сочетание СПП с дифракционной асферику. Этот случай отличается универсальностью, поскольку подобный компонент может быть построен для любого увеличения, хотя характеристики асферики, конечно, зависят от него, так как меняется сферическая aberrация СПП. Наконец, условие (1) выполняется, если имеет место соотношение

$$\frac{s_1' - r}{d - r} + \frac{s_1'(d - r)^2}{r^2(s_1' - d)} \left( 1 - \frac{n's_1'}{ns_1} \right) - 2 = 0, \quad (3)$$

которое приводит к сочетанию СПП с ДЛ, имеющей конечное фокусное

расстояние  $f$ , причем как  $f$ , так и  $d$  сильно зависят от увеличения комбинационного компонента.

Таким образом, анализ дуплета СПП-ДЛ показал, что наиболее удобным и универсальным способом построения указанного компонента при условии компенсации сферической aberrации, комы и астигматизма является помещение дифракционной асферики в плоскость, проходящую через центр кривизны СПП. Отсутствие оптической силы у асферики позволяет не учитывать эти элементы при расчете как гауссовых характеристик системы, так и ее первичных aberrаций. Вместо дуплета СПП-асферика на указанных этапах конструирования объектива можно оперировать одной сферической поверхностью, свободной от всех первичных aberrаций, кроме кривизны поля и дисторсии, коэффициенты которых даются выражениями

$$F_3 = \frac{n'(n-n')}{nr(s'_1-t')^2}; \quad D_3 = -\frac{t'-r}{s'_1-r}F_3, \quad (4)$$

где  $t'$  — расстояние от СПП до ее выходного зрачка. Преломляющую поверхность с описанными свойствами будем называть компенсированной. Отметим, что для того, чтобы СПП была компенсированной, асферика не обязательно должна находиться в плоскости центра кривизны поверхности; она может также располагаться в плоскости, в которой лежит действительное изображение центра. При этом, конечно, изменяются характеристики асферики, но свойства компонента, т. е. коэффициенты (4), остаются теми же. Плоская преломляющая поверхность не может быть непосредственно компенсирована, поскольку ее центр кривизны бесконечно удален, но если в системе есть элемент, который оптически сопрягает эту бесконечно удаленную точку с осевой точкой асферики, то компенсированная плоской поверхности возможно.

Оптическая система, состоящая только из компенсированных поверхностей (допустимы также апланатические), заведомо свободна от сферической aberrации, первичных комы и астигматизма. Компенсация кривизны поля третьего порядка достигается при выполнении условия Пецваля [6], а компенсация дисторсии имеет место при равенстве нулю пятой суммы Зайделя [7], которая в рассматриваемом случае принимает вид

$$S_V = \sum_i h_i H_i^3 \frac{n'_i(n_i - n'_i)}{n_i s'_i (r - s'_i)} \left(1 - \frac{s'_i}{t'_i}\right) \left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{t'_i}\right), \quad (5)$$

где  $h$ ,  $H$  — высоты главного и предметного нулевых лучей;  $i$  — номер преломляющей поверхности.

Aberrации пятого порядка дуплета СПП-асферика имеют более сложную структуру, чем первичные. Во всех случаях равна нулю первая сферическая aberrация и не равна нулю первая кома, наличие остальных типов aberrаций зависит от положения выходного зрачка. В области пятого и высших порядков уже нельзя пользоваться понятием компенсированной поверхности: значительное влияние здесь оказывает фактическое положение асферики, компенсирующей данную поверхность, что не имеет места в области первичных aberrаций.

В качестве примера использования компенсированных поверхностей приведем схему симметричного комбинационного объектива, включающего два рефракционных мениска с равными радиусами и две дифракционных асферики (рис. 2). Каждая из асферик компенсирует выгнувшую поверхность ближнего мениска и вогнутую — дальнего. Для того чтобы это было возможно, требуется выполнение соотношения

$$d_2 = [(2r + (n - 2)d_1)/r + (n - 1)d_1]r, \quad (6)$$

где  $r$ ,  $d_1$ ,  $n$  — радиус поверхностей, толщина и показатель преломления менисков;  $d_2$  — расстояние между менисками. При этом соотношение радиуса  $r$  и отрезка объектива дается выражением

$$|r/s| = [(n - 1)^2 d_1 / r] / n + (n - 1) d_1 / r, \quad (7)$$

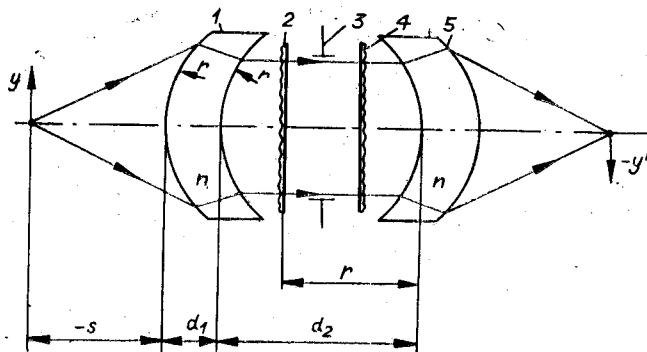


Рис. 2. Оптическая схема симметричного комбинированного объектива:  
1, 5 — рефракционные мениски; 2, 4 — дифракционные асферики; 3 — апертурная диафрагма.

из которого следует, что при разумных значениях величины  $d_1/r$  радиус поверхностей менисков мал по сравнению с отрезками, а это накладывает существенные ограничения на апертуру объектива. Ясно, что мениски с равными радиусами не являются удачными силовыми компонентами, однако отказ от них ведет к нарушению условия Пецваля и необходимости поиска других путей его выполнения.

В заключение подчеркнем, что использование компенсированных поверхностей служит приемом компоновки первоначальной, исходной, схемы объектива, которая требует дальнейшей оптимизации. В процессе оптимизации возможно (и даже неизбежно) как нарушение условия  $d = r$  в дуплете СПП-асферика, так и придание оптической силы корректирующим дифракционным элементам, что, кстати, необходимо для хроматической коррекции системы. Тем не менее компенсированные поверхности позволяют получать исходные схемы, поддающиеся оптимизации (что бывает далеко не всегда), причем их первоначальные параметры оказываются достаточно близкими к оптимизированным.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бобров С. Т., Котлецов Б. Н., Туркевич Ю. Г. Проекционный объектив с дифракционными линзами.— *Опт. и спектр.*, 1984, т. 57, вып. 2, с. 349—354.
2. Левин В. Я., Соскин С. И. Аберрационные свойства объектива с киноформным корректором.— В кн.: *Киноформные оптические элементы.*— Новосибирск: ИАиЭ СО АН СССР, 1981, с. 93—106.
3. Бобров С. Т., Туркевич Ю. Г. Дифракционные оптические элементы, изготавливаемые методами фотолитографии.— В кн.: *Применение лазеров в системах передачи, преобразования и обработки информации.*— Л.: ЛДНТП, 1978, с. 73—77.
4. Грейсух Г. И. Монохроматические аберрации оптической системы линза — голограмма.— *Опт. и спектр.*, 1978, т. 44, вып. 1, с. 168—172.
5. Шитов В. Г., Грейсух Г. И. Компенсация аберраций в простейших рефракционно-дифракционных оптических системах.— *Опт. спектр.*, 1981, т. 50, вып. 4, с. 786—792.
6. Русинов М. М. *Техническая оптика.*— Л.: Машиностроение, 1979.
7. Чуриловский В. Н. *Теория хроматизма и аберраций третьего порядка.*— Л.: Машиностроение, 1968.

Поступила в редакцию 5 мая 1985 г.