

НОВАЯ ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ОПТИКИ. КИНОФОРМЫ

УДК 535.317.2

С. Т. БОБРОВ, Г. И. ГРЕЙСУХ

(Ленинград)

ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩИЕ ПРОЕКЦИОННЫЕ ОБЪЕКТИВЫ НА ОСНОВЕ ДИФРАКЦИОННЫХ ЛИНЗ

В настоящее время определенный интерес вызывает использование осевых дифракционных линз для создания проекционных объективов. Дифракционной линзой (ДЛ) называют оптический элемент типа зонной пластинки, состоящий из концентрических кольцевых штрихов и обладающий фокусирующими свойствами за счет дифракции света на его структуре. Исследования ДЛ как компонентов оптических систем [1—3] показали, что они во многом отличаются от своих рефракционных аналогов. Аберрационное разложение ДЛ, т. е. представление ее монохроматических аберраций в виде суммы членов третьего, пятого и высших порядков малости, является гораздо более быстросходящимся рядом, чем в случае преломляющей поверхности. Кроме того, существует возможность управления сферической аберрацией ДЛ за счет изменения закона следования кольцевых штрихов в ее структуре, что легко реализуется при изготовлении ДЛ фотолитографическим методом [4]. Аналогичные результаты в рефракционной оптике достигаются путем придания асферичности преломляющей поверхности, но это приводит к существенному усложнению технологии изготовления линз. Наконец, осевая ДЛ характеризуется совпадением коэффициентов ряда полевых аберраций. Например, в третьем порядке малости равны коэффициенты астигматизма и кривизны поля, в пятом порядке девять типов аберраций описываются шестью коэффициентами [2] и т. д.

С другой стороны, ДЛ обладают значительными хроматическими аберрациями. В случае равенства оптических сил дифракционной и рефракционной линз ДЛ имеет, как правило, в 10—20 раз больший первичный хроматизм, который зависит только от ее отрезков, тогда как для рефракционной линзы существует возможность некоторого управления хроматизмом за счет подбора стекла. Отметим, что ДЛ имеет хроматические аберрации противоположного знака, чем рефракционная линза с той же оптической силой, что создает благоприятные условия для компенсации хроматизма в комбинированных, рефракционно-дифракционных объективах.

В оптических системах, содержащих только дифракционные элементы (дифракционных объективах), наоборот, практически невозможно скомпенсировать хроматические искажения, но зато достигается хорошая коррекция монохроматических аберраций при минимальном числе ДЛ. Уже в двухлинзовой системе оказывается возможным скомпенсировать все монохроматические аберрации третьего порядка независимо от увеличения объектива [5]. В рефракционной оптике аналогичная задача решается с помощью трех преломляющих поверхностей, две из которых асферические [6]. Необходимость трех рефракционных элементов, вместо двух дифракционных, является следствием неравенства коэффициентов

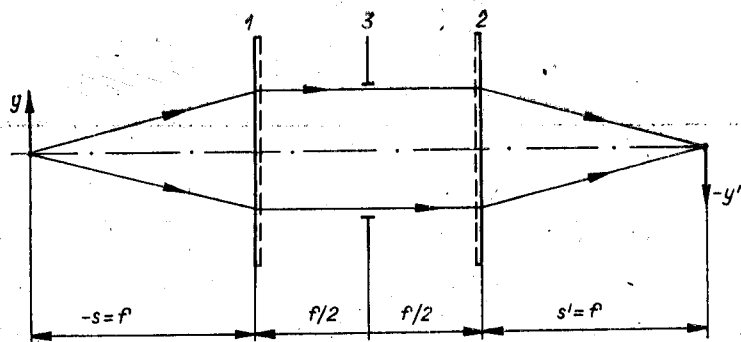


Рис. 1. Оптическая схема симметричного двухлинзового объектива:
1, 2 — дифракционные линзы; 3 — апертурная диафрагма.

астигматизма и кривизны поля у преломляющей поверхности и не столь важно, как то обстоятельство, что рефракционный объектив, свободный от первичных aberrаций, содержит оптически сильные положительные и отрицательные компоненты и в результате имеет ограниченную апертуру и большие остаточные aberrации пятого и высших порядков. Дифракционный объектив состоит из двух положительных ДЛ с оптическими силами одного знака, и его остаточные aberrации малы, т. е. в этом случае компенсация только третьего порядка позволяет получить достаточно большое поле зрения при высокой апертуре. В качестве примера приведем данные по симметричному двухлинзовому объективу [7], схема которого (рис. 1) включает две одинаковые ДЛ, каждая из которых является интерференционной зонной пластинкой, т. е. формирует безабберационное изображение бесконечно удаленного точечного источника на оси линзы. Структура такой ДЛ описывается выражением

$$r_n = \sqrt{2n\lambda f + n^2\lambda^2}, \quad (1)$$

где n — номер кольцевого штриха или зоны; r_n — радиус n -го штриха; f — фокусное расстояние ДЛ; λ — рабочая длина волны. В симметричном объективе ДЛ расположены на расстоянии f друг от друга, тогда он будет свободен от первичных aberrаций при работе с увеличением $\beta = -1$ (отрезки s , s' равны в этом случае фокусному расстоянию ДЛ). Расчеты методом прослеживания хода лучей показывают, что у описанной системы можно получить такие же разрешения и поле зрения, как у 8–10 линзовых рефракционных объективов. Так, при $f = 280$ мм и апертуре $u = 0,1$ на длине волны $\lambda = 441,6$ нм дифракционное разрешение $\delta = 2,7$ мкм обеспечивается по полю $2y' = 65$ мм.

Если конструкция двухлинзовой дифракционной системы практически полностью определяется условиями компенсации первичных aberrаций, то при переходе к трехлинзовым объективам число коррекционных параметров возрастает и становится возможным различное построение опти-

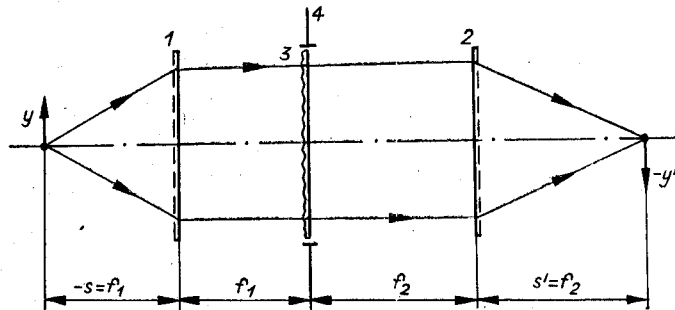
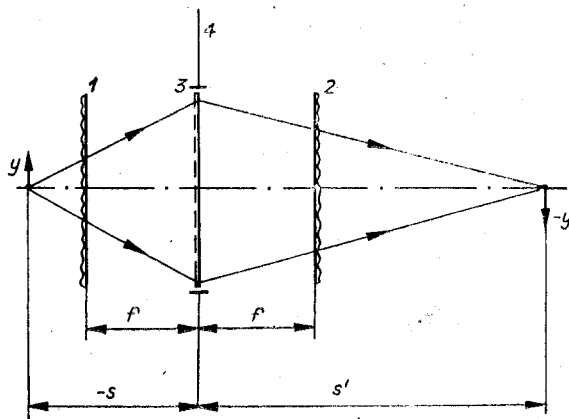


Рис. 2. Оптическая схема пропорционального трехлинзового объектива:
1, 2 — силовые ДЛ; 3 — дифракционная асферика; 4 — апертурная диафрагма.

Рис. 3. Оптическая схема трехлинзового объектива с двумя асфериками:

1, 2 — дифракционные асферика; 3 — силовая ДЛ с фокусным расстоянием $f = (1/S' - 1/S)^{-1}$; 4 — апертурная диафрагма.



ческой схемы при сохранении компенсации первичных aberrаций. Одним из вариантов компоновки трехлинзового объектива является пропорциональная схема, представленная на рис. 2. Две ДЛ расположены по разные

стороны апертурной диафрагмы, причем каждая отстоит от нее на свое фокусное расстояние. В плоскости диафрагмы находится дифракционная асферика, т. е. ДЛ без оптической силы, которая выполняет функции корректора сферической aberrации. Если описанный объектив работает с увеличением $\beta = -M$, где $M = f_2/f_1$ — отношение фокусных расстояний двух силовых ДЛ, то в нем можно скомпенсировать помимо первичных почти все aberrации пятого порядка; остается только вторая кома, влияние которой уменьшается, если, изменяя расстояния от силовых ДЛ до асферика, ввести небольшую первичную кому противоположного знака. В симметричном трехлинзовом объективе [8] вообще отсутствуют все aberrации третьего и пятого порядков. В пропорциональной схеме обе силовые линзы являются зонными пластинками Френеля, т. е. их структуры описываются выражением

$$r_n = \sqrt{2n\lambda f}. \quad (2)$$

Пропорциональные дифракционные объективы обладают очень высокими aberrационными качествами. Так, при $\beta = -1$ и фокусном расстоянии силовых ДЛ $f = 210$ мм (что дает такое же расстояние от предмета до изображения, как в приведенном выше примере симметричного двухлинзового объектива) трехлинзовый объектив с апертурой $u = 0,1$ на длине волны $\lambda = 441,6$ нм обеспечивает дифракционное разрешение по полю $2y' = 150$ мм, а при увеличении апертуры до $u = 0,2$ — по полю $2y' = 80$ мм. К сожалению, в описанной системе очень велика частота структуры силовых линз, причем она тем больше, чем больше поле изображения. Сохраняя в целом компоновку объектива, но отступая от строгой пропорциональности схемы, удастся значительно снизить частоту структуры длиннофокусной силовой ДЛ [9], однако короткофокусная часть объектива остается практически неизменной. Кроме того, этот прием применим, только если отношение f_2/f_1 достаточно велико ($M \geq 4$).

Второй путь снижения частоты структуры дифракционных элементов объектива заключается в полном отказе от пропорционального построения схемы и в своеобразной рокировке силовых и корректирующих элементов. Силовая ДЛ помещается в плоскость апертурной диафрагмы (рис. 3), таким образом, ее диаметр и частота структуры становятся независимыми от размера поля изображения. По обе стороны от ДЛ в ее фокальных плоскостях расположены две дифракционные асферика. Aberrационный анализ показывает, что в описанной схеме при любом увеличении в диапазоне $-\infty < \beta < 0$ можно полностью скомпенсировать все aberrации третьего и пятого порядка [10], причем силовая ДЛ опять оказывается зонной пластинкой Френеля. Объектив с двумя асфериками, как и пропорциональные системы, обладает высокими aberrационными качествами, а его реализация технологически проще вследствие меньшей частоты структуры элементов. Так, при $\beta = -1$ и фокусном расстоянии силовой ДЛ $f = 210$ мм объектив с асфериками, имеющий апертуру

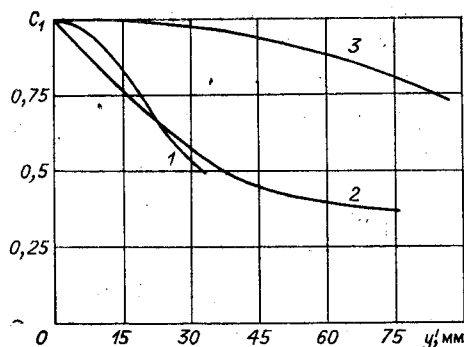


Рис. 4. Зависимости контраста изображения, формируемого дифракционными объективами, от радиуса рабочего поля:

1 — симметричный двухлинзовый объектив; 2 — симметричный трехлинзовый объектив с двумя силовыми ДЛ; 3 — симметричный трехлинзовый объектив с двумя асфериками.

$u = 0,1$ на длине волны $\lambda = 441,6$ нм, обеспечивает дифракционное разрешение по полю $2y' = 170$ мм, причем минимальная ширина штриха в структуре силовой ДЛ $T_{\min} = 2,2$ мкм, тогда как в пропорциональной системе с полем $2y' = 150$ мм $T_{\min} = 1,0$ мкм.

Следует подчеркнуть, что все описанные дифракционные объективы способны работать только в узком спектральном диапазоне, поскольку никаких мер по их хроматической коррекции не принималось, да и не могло быть принято. Допустимая ширина спектра освещения $\Delta\lambda$ зависит в основном от разрешения и габаритного размера системы. Например, в схеме с двумя асфериками $\Delta\lambda$ можно оценить по формуле, которая выводится из условия предельно возможной расфокусировки (по критерию Рэлея) при изменении длины волны:

$$\Delta\lambda \approx 2,7\delta^2/L, \quad (3)$$

где $L = 4f$ — габаритный размер, т. е. расстояние от предмета до изображения. Для двухлинзового симметричного объектива соответствующая формула имеет вид $\Delta\lambda \approx 4\delta^2/L$, для трехлинзового с двумя силовыми ДЛ — $\Delta\lambda \approx 5,4\delta^2/L$. Подставляя в приведенные выражения $\delta = 2,7$ мкм, $L = 840$ мм, получаем допустимую ширину спектра освещения $\Delta\lambda \sim 0,02-0,04$ нм, что может быть обеспечено только лазерным источником.

Необходимо также отметить, что дифракционные объективы характеризуются невысоким отношением сигнал/шум. Это является следствием того, что только часть падающего на ДЛ света дифрагирует в рабочий, первый порядок дифракции. При изготовлении дифракционных элементов фотолитографическим методом на существующем оборудовании эффективность силовых линз не будет превышать 40%, а у оптически слабых ДЛ и асферик ее можно получить порядка 80—90%. Следовательно, светопропускание объективов с одной оптически сильной ДЛ составит 30—35%, а пропускание объективов с двумя силовыми ДЛ окажется не выше 16%. Остальной свет в значительной мере также проходит через объектив, создавая фон, на котором находится полезное изображение. На рис. 4 представлены графики зависимостей контраста изображения от диаметра рабочего поля для различных типов дифракционных объективов, работающих с увеличением $\beta = -1$. Наилучшие характеристики имеет объектив с двумя асфериками в силу наличия в нем только одной силовой ДЛ, однако и в этом случае контраст изображения при большом рабочем поле недостаточен, поэтому использовать дифракционные объективы предпочтительно в таких устройствах, где осуществляется, например, регистрация изображения бинарного объекта на контрастном светочувствительном материале, как это имеет место в фотолитографии и некоторых системах обработки информации.

Следует, однако, иметь в виду, что на рис. 4 даны значения контраста для изображения объекта, представляющего собой равномерно освещенный диск. На практике объект всегда состоит из светлых и темных участков и его можно характеризовать коэффициентом заполнения $\kappa = S_{\text{св}}/S$, где S — общая площадь; $S_{\text{св}}$ — площадь светлых участков объ-

екта; поэтому контраст реального изображения оценивается по формуле [7]

$$C_* = C / (\kappa + (1 - \kappa)C). \quad (4)$$

Здесь C — контраст изображения полностью светлого объекта той же площади [7]. Выражение (4) показывает, что отношение сигнал/шум значительно увеличивается, если коэффициент $\kappa \leq 0,1$.

Учитывая вышеизложенное, можно считать, что одной из наиболее перспективных областей использования дифракционных объективов являются системы оптической обработки информации. Во-первых, в них в качестве источников света в основном применяются лазеры. Во-вторых, объекты в этих системах зачастую характеризуются малыми коэффициентами заполнения. В этих условиях недостатки дифракционных элементов вполне искупаются такими полезными качествами ДЛ и оптических систем на их основе, как малый вес, повторяемость, стабильность характеристик, возможность копирования и тиражирования элементов. Кроме того, технология изготовления ДЛ методами фотонабора и ионного травления стекла создана на основе процессов, применяемых в производстве интегральных схем [4], и в большей мере приемлема для массового производства, чем технология изготовления рефракционных линз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Meier R. W. Magnification and third — order aberrations in holography.— JOSA, 1965, v. 55, p. 987—992.
2. Бобров С. Т., Туркевич Ю. Г. Методика расчета волновых aberrаций сложных голографических систем.— Опт. и спектр., 1979, т. 46, вып. 5, с. 986—991.
3. Ган М. А. Aberrации третьего порядка и основные параметры осесимметричных голографических элементов.— Опт. и спектр., 1979, т. 47, вып. 4, с. 759—763.
4. 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—78.
5. А. с. 1053055 (СССР). Монохроматический объектив/С. Т. Бобров, Г. И. Грейсух.— Оpubл. в Б. И., 1983, № 41.
6. Schulz G. Primary aberration — free imaging by three refracting surfaces.— JOSA, 1980, v. 70, N 9, p. 1149—1152.
7. 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.
8. А. с. 913318 (СССР). Монохроматический объектив/С. Т. Бобров, Ю. Г. Туркевич.— Оpubл. в Б. И., 1982, № 10.
9. А. с. 995053 (СССР). Монохроматический объектив десятикратного увеличения/Г. И. Грейсух, В. Г. Шитов.— Оpubл. в Б. И., 1983, № 5.
10. А. с. 10452203 (СССР). Монохроматический объектив/С. Т. Бобров.— Оpubл. в Б. И., 1983, № 36.

Поступила в редакцию 5 мая 1985 г.

УДК 535.4 : 778.38

Г. А. ЛЕНКОВА

(Новосибирск)

ПОВОРОТНЫЙ ФОКУСИРУЮЩИЙ КИНОФОРМ

В связи с развитием лазерной технологии [1] представляет интерес рассмотреть возможность создания отражающего киноформа, совмещающего функции двух оптических элементов, один из которых отклоняет световой пучок на требуемый угол, а другой — фокусирует его на фоточувствительный материал, экран и т. п. Такая проблема возникает, в частности, при разработке оптических схем для систем вывода информа-