

А. Г. ПОЛЕЩУК

(Новосибирск)

## СОВМЕЩЕНИЕ ДИФРАКЦИОННЫХ И РЕФРАКЦИОННЫХ КОМПОНЕНТОВ В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

**Введение.** Одним из путей развития современной оптики является широкое практическое применение многоуровневых дифракционных оптических элементов (киноформов) [1]. Компоненты киноформной оптики могут изготавливаться на тонких плоских подложках методом фотолитографии, что открывает перспективу создания дешевых, компактных и функционально сложных оптических приборов.

Наиболее широкими возможностями формирования изображения и преобразования световых полей обладают оптические системы, состоящие из нескольких дифракционных, а в общем случае и рефракционных оптических элементов. Для реализации потенциальных возможностей таких оптических систем необходимо точное совмещение центров кривизны рефракционных (линзы, объективы) и центров зон дифракционных компонентов с оптической осью. Погрешность в центровке компонентов, возникающая в результате неточностей изготовления или сборки, приводит к появлению аберраций.

Методы центровки линз при сборке обычных объективов хорошо известны [2, 3] и широко применяются в практике оптического приборостроения. Однако применение известных методов при создании оптических систем с дифракционными оптическими элементами (ДОЭ) не всегда возможно из-за ограниченной точности совмещения и специфических особенностей ДОЭ (плоская подложка, разнообразие передаточных функций, возможность нанесения структуры ДОЭ в процессе создания оптической системы непосредственно на линзу и т. д.). Поэтому разработка способов центровки ДОЭ, сборки сложных многокомпонентных оптических систем на их основе и последующего контроля точности совмещения представляет значительный интерес. В данной работе излагается разработанный способ совмещения (центровки) ДОЭ по отношению к другим элементам оптической системы, отличающийся простотой и высокой точностью. Данный способ может также использоваться для совмещения фотошаблонов в процессе изготовления ДОЭ методом фотолитографии.

**Способ совмещения.** Предлагаемый способ основан на том, что при изготовлении фотошаблонов ДОЭ методом фотолитографии на одной подложке может быть создано несколько дифракционных структур, каждая из которых преобразует световой поток по заданному закону. Причем взаимное положение этих структур (например, их центров симметрии) выдерживается с точностью порядка 0,1 мкм [4]. Для ДОЭ с осевой симметрией (объективы, корректоры аберраций и т. д.) в центральной части располагается основная, рабочая, зона, а на периферии, вне светового диаметра, — вспомогательная в виде тонкого кольца (рис. 1, а) или его отрезков (рис. 1, б), лежащих на противоположных сторонах подложки. Оптические характеристики дифракционной структуры (место расположения, фокусное расстояние и т. д.) вспомогательной зоны (или знаков совмещения по аналогии с техникой фотолитографии) определенным образом согласуются с оптическими характеристиками базового элемента, по отношению к которому производится совмещение (центровка). Базовым элементом может служить стеклянная линза или другой ДОЭ. Характеристики вспомогательной дифракционной структуры выбираются на этапе расчета оптической системы таким образом, чтобы световой поток, проходящий базовый элемент и ДОЭ, не отклонялся бы от оптической оси при точном наложении центров совмещаемых элементов. Если базовым элементом является сферическая линза, то дифракционная структура внутри вспомогательной зоны должна иметь вид зонной пластинки Фре-

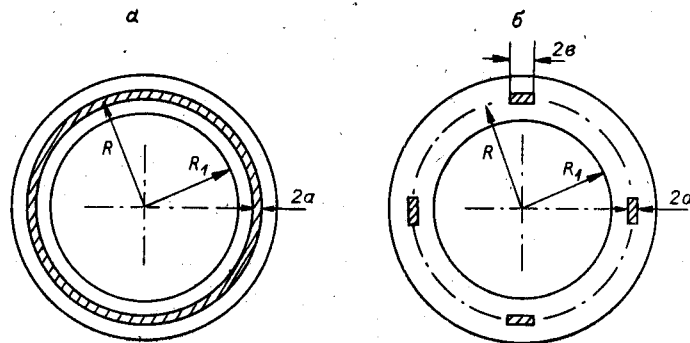


Рис. 1.

неля с фокусным расстоянием, равным по величине (если расстояние между главными плоскостями линзы и зонной пластинки достаточно мало) и обратным по знаку фокусному расстоянию линзы. Очевидно, что в этом случае эквивалентное фокусное расстояние ( $f_3 = f_1 f_2 / (f_1 + f_2 - l)$ ), где  $f_1$  и  $f_2$  — соответственно фокусные расстояния вспомогательных зон первого и второго компонентов;  $l$  — расстояние между ними) системы, состоящей из установленных последовательно линзы и вспомогательной зоны ДОЭ, стремится к бесконечности и проходящий их коллимированный световой поток не претерпевает отклонения. Если же центры симметрии линзы и ДОЭ смещены друг относительно друга, то прошедший элемент световой поток отклонится на некоторый угол к оптической оси. Для совмещения расположенных вдоль оптической оси двух и более ДОЭ фокусные расстояния вспомогательных зон выбираются аналогичным образом. Величина угла отклонения светового потока регистрируется, например, автоколлиматором и служит мерой децентровки оптических компонентов.

На рис. 2, а изображен вариант коллимационной оптической схемы устройства контроля совмещения. Источник света 1 (например, лазер) с помощью телескопической системы 2 освещает пучком света с плоским волновым фронтом совмещаемую оптическую систему — линзу 3 и корректирующий aberrации ДОЭ 4. Далее световой поток поступает в объектив 5, в фокальной плоскости которого располагается сетка с перекрестием 6 и последовательно окуляр 7. При правильной центровке компонентов 3 и 4 точка фокусировки светового потока, прошедшего линзу 3 и вспомогательную зону ДОЭ, лежит на оптической оси в перекрестье сетки, а при децентровке — смещается в сторону. Совмещение компонентов можно контролировать фотоэлектрическим способом, располагая в фокальной плоскости объектива 5 фотоматрицу, связанную с системой управления и индикации. Процесс совмещения в этом случае может быть полностью автоматизирован.

Оптическая схема автоколлимационного устройства контроля совмещения изображена на рис. 2, б. Совмещаемые компоненты 3 и 4 устанавливаются между выходом автоколлиматора 1 и плоским зеркалом 2. Световой поток с выхода автоколлиматора дважды проходит совмещаемые компоненты, и автоколлимационное изображение перекрестия в увеличенном масштабе наблюдается через окуляр прибора.

**Оценка точности совмещения.** Рассмотрим объектив (см. рис. 2), оптические элементы которого (сферическая линза 3 и корректирующий aberrации ДОЭ 4) можно представить в виде транспарантов с амплитудным пропусканием, равным соответственно

$$T_1(x, y) = \exp[-j\alpha_1(x^2 + y^2)]$$

и

$$T_2(x, y) = \exp[-j\varphi(x, y)] \text{rect}(x/R_1) + \exp[j\alpha_2(x^2 + y^2)] \times \\ \times [\text{rect}((x - R)/2a) + \text{rect}((x + R)/2a)] \text{rect}(y/2b), \quad (1)$$

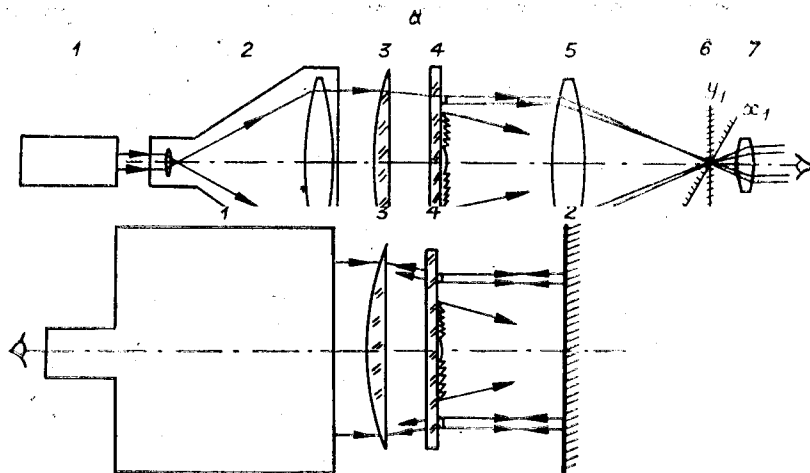


Рис. 2.

где  $\alpha_1 = \pi/\lambda f_3$ ,  $\alpha_2 = \pi/\lambda f_4$ ;  $\lambda$  — длина волны света;  $f_3$ ,  $f_4$  — фокусные расстояния элементов 3 и 4;  $R_1$  и  $R$  — радиусы основной и вспомогательной зон (см. рис. 1, б);  $2a$  и  $2b$  — соответственно ширина и длина участка вспомогательной зоны;  $\varphi(x, y)$  — фазовое распределение корректора.

Тогда при смещении ДОО относительно линзы вдоль оси  $x$  на величину  $d$  распределение интенсивности в фокальной плоскости объектива 5 имеет вид

$$I(x_1, y_1) = |\mathcal{F}[E_0 T_1(x, y) T_2(x - d, y)]|^2. \quad (2)$$

Здесь  $E_0$  — амплитуда освещающей объектив волны света с плоским волновым фронтом;  $\mathcal{F}[\cdot]$  — оператор Фурье-преобразования;  $x_1$ ,  $y_1$  — координаты в фокальной плоскости объектива 5. Подставляя (1) в (2) и ограничиваясь для простоты одномерным случаем (соответствующим рис. 1, б), получим

$$I(x_1) = \frac{E_0^2 \pi^2}{2A} \cos^2 BR |\Phi(\xi_1/\sqrt{i}) - \Phi(\xi_2/\sqrt{i})|^2, \quad (3)$$

где  $A = \alpha_1 - \alpha_2$ ;  $B = 2\alpha_2 d + 2\pi x_1/\lambda f_5$ ;  $\xi_{1,2} = \sqrt{2A/\pi}(\mp a - d - B/2A)$ ;  $\Phi(z)$  — интеграл вероятности.

Если фокусные расстояния базовой линзы и вспомогательной зоны ДОО близки между собой ( $f_3 \approx f_4$ ), то аргумент  $\xi$  в (3) достаточно велик и можно воспользоваться асимптотическим разложением интеграла вероятности. При этом выражение (3) принимает вид

$$I(x_1) = \frac{E_0^2 4\pi^2}{B^2} \cos^2 BR \sin^2 \left( \frac{2Ba + 4Ada}{\pi} \right). \quad (4)$$

Для центральной части поля наблюдения  $x_1 \approx 0$ , и, учитывая, что  $a \ll R$ , окончательно имеем

$$I(x_1) = E_0^2 16a^2 \left[ 1 + \cos \left( \frac{4\pi R}{\lambda f_5} x_1 + \frac{4\pi R}{\lambda f_4} d \right) \right]. \quad (5)$$

Аналогичное выражение может быть получено для распределения интенсивности по координате  $y_1$ . Таким образом, распределение интенсивности светового потока в фокальной плоскости объектива 5 по каждой из координат имеет вид интерференционной картины с начальной фазой  $\varphi = 4\pi R d/\lambda f_4$ , пропорциональной взаимному смещению компонентов. Если

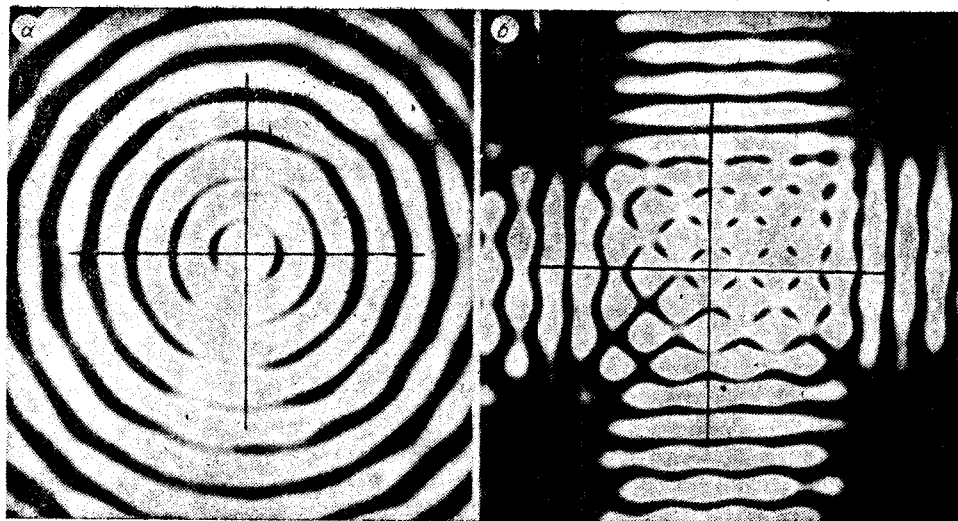


Рис. 3.

же дополнительная зона ДОЭ выполнена в виде кольца (см. рис. 1, а), то интерференционная картина состоит из concentрических колец с постепенно спадающей интенсивностью.

Точность совмещения можно оценить, пользуясь выражением (5) и задаваясь величиной снижения интенсивности в центре плоскости наблюдения ( $x_1 = 0$ ) до уровня 0,7 (критерий Рэлея). В этом случае минимальное обнаруживаемое смещение

$$d_{\min} \approx 0,1\lambda f_1/R. \quad (6)$$

При  $\lambda = 0,63$  мкм,  $f_1 = 150$  мм,  $R = 10$  мм  $d_{\min} = 1$  мкм. Из выражения (6) следует, что точность визуального совмещения определяется апертурой  $R/f_1$  компонентов и составляет примерно 0,2 от диаметра кружка Эйри.

**Результаты эксперимента.** Способ совмещения проверялся с помощью оптической системы, изображенной на рис. 2, а. Исследовалось совмещение сферической линзы с фокусным расстоянием  $\approx 150$  мм и стеклянной пластинки, на одной из поверхностей которой по термохимической технологии [5] была нанесена кольцевая зона ( $2R = 15$  мм,  $2a = 0,5$  мм) с зонной пластинкой Френеля, имеющей фокусное расстояние 150 мм для  $\lambda = 0,63$  мкм. На рис. 3 приведены распределения интенсивности светового потока в фокальной плоскости объектива 5 ( $f_5 = 300$  мм) при освещении совмещаемых компонентов коллимированным пучком света. Приведенное на рис. 3, а и б распределение интенсивности соответствует формам вспомогательных зон, показанных на рис. 1, а и б ( $2b = 2$  мм). Чувствительность способа оценивалась по смещению наблюдаемой дифракционной картины относительно перекрестья, совмещенного предварительно с оптической осью устройства. При перемещении ДОЭ относительно линзы на величину  $d = 8$  мкм дифракционная картина смещалась на ширину первого черного кольца, что соответствует расчетному значению, полученному по формуле (5). Точность совмещения центра дифракционной картины с перекрестьем составляла 1—2 мкм.

**Заключение.** Предлагаемый способ позволяет выполнять: 1) совмещение с оптической осью центров симметрии сферической линзы и корректирующих aberrаций ДОЭ с точностью 0,1—1 мкм (в зависимости от апертуры совмещаемой линзы); 2) совмещение с оптической осью нескольких расположенных последовательно ДОЭ; 3) совмещение фотошаблонов при изготовлении методом фотолитографии как отдельных ДОЭ (киноформов), так и дифракционных корректоров непосредственно на плоской поверхности плосковыпуклой линзы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Коронкевич В. П. и др. Киноформные оптические элементы — методы расчета, технология изготовления, практическое применение. — Автометрия, 1985, № 1, с. 3—24.
2. Оптический производственный контроль/Под ред. Д. Малагары.— М.: Машиностроение, 1985.
3. Белоглазов А. А., Орнис А. Н. Коллимационные и автоколлимационные устройства для контроля центрирования линз.— ОМП, 1972, № 10, с. 57—62.
4. Koronkevich V. P. e. a. Fabrication of kinoform optical elements.— Optik, 1984, Bd 67, N 3, S. 259—266.
5. Коронкевич В. П., Полецук А. Г., Чурин Е. Г., Юрлов Ю. И. Лазерная термохимическая технология синтеза дифракционных оптических элементов на пленках хрома.— Квант. электроника, 1985, т. 12, № 4, с. 755—761.

*Поступила в редакцию 24 июня 1985 г.*

УДК 621.373.826 : 621.396

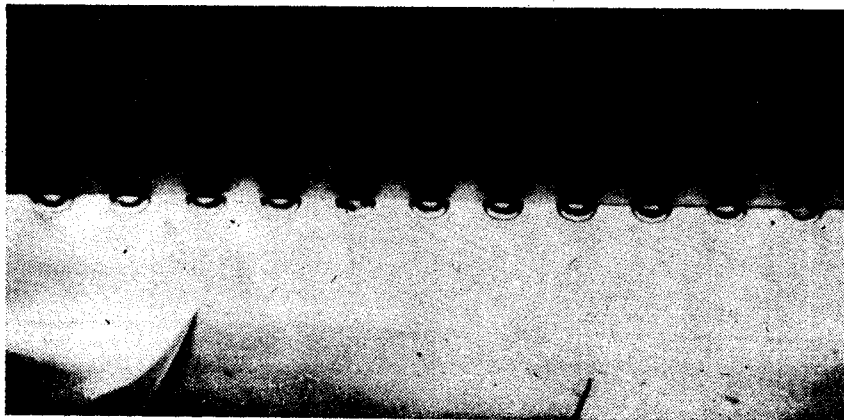
**И. Д. БРЕГЕДА, В. А. НИКИТИН, Е. П. НИКИТИНА,  
В. И. ЧЕРНИКОВ, Н. А. ЯКОВЕНКО**  
(Краснодар)

### **МАТРИЦА ГРАДИЕНТНЫХ МИКРОЛИНЗ, ИЗГОТОВЛЕННАЯ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОСТИМУЛИРОВАННОЙ ДИФФУЗИИ**

Развитие оптоэлектронных систем обработки информации и волоконно-оптических линий связи обусловило интенсивный рост научных и конструкторских разработок, направленных на решение задачи надежного соединения одно- и многоволоконных световодных кабелей.

При создании оптических разъемов целесообразно применять микролинзы, расширяющие и коллимирующие световой пучок, выходящий из торца оптического волокна. Микролинзы, используемые в оптических разъемах, могут быть изготовлены в виде сапфировых или стеклянных шариков, помещаемых перед стыкуемыми волокнами [1], миниатюрных двояковыпуклых линз [2] и, наконец, градиентных микролинз, сформированных непосредственно в стеклянной подложке [3, 4].

Целью настоящей работы являются разработка методики изготовления матриц градиентных микролинз с большим числом элементов и исследование их оптических характеристик, а также выявление возможно-



*Рис. 1.*