

дифракционных эффективностей. Из таблицы видно, что интегральные дифракционные эффективности для рабочих порядков ($l = -1$) близки к локальным (см. рис. 3, а, б), что свидетельствует о малых технологических погрешностях изготовления по всей апертуре линз. Полученные значения интегральных эффективностей в рабочем порядке оказались на 6—7% ниже расчетных η_{-1} для соответствующих решеток. Те же результаты для $l \neq -1$ расходятся больше (см. табл. 2). Несоответствие расчетных и экспериментальных ДЭ может быть объяснено погрешностями изготовления. Из приведенных результатов по внесевой линзе (см. рис. 3, а, табл. 2) видно, что усложнение профиля и увеличение числа его ступеней в данном случае не привело к улучшению энергетических характеристик линзы, что совпадает с результатами работы [5].

Цилиндрическая киноформная линза при освещении ее параллельным пучком в рабочем порядке дифракции формирует функцию рассеяния ФРЛ в виде линии (сигнал), а при дифракции в нерабочие порядки — фон [4]. Ширина ФРЛ определяет разрешение, а соотношение интенсивности сигнала и фона — динамический диапазон передачи полутон. ФРЛ (рис. 4) исследовалась для осевой линзы по схеме рис. 2 (без линзы Л) сканированием ФЭУ со целью, равной 0,2 видимого размера пучка в плоскости фокусировки рабочего порядка. Из рис. 4 видно, что распределение интенсивностей близко к гауссовому с размером пучка по уровню e^{-2} , равным 0,13 мм. Наибольший уровень фона наблюдается в окрестности сфокусированного пучка и составляет 1,7%. Визуально изображение выглядит как безаберрационное. Фон светорассеяния удовлетворителен для большинства применений.

В заключение отметим, что приведенные результаты свидетельствуют о хорошем технологическом уровне изготовления киноформных цилиндрических линз с малым относительным отверстием (около 1:60) и могут быть использованы в разработке длиннофокусных оптических систем. При объединении элементов такого типа со сферическими линзами можно получить светосильные анаморфотные системы рефракционно-дифракционного типа, трудно реализуемые методами традиционной оптики.

ЛИТЕРАТУРА

1. D'Auria L., Huignard J. P., Poy A. M., Spitz E. Photolithographic fabrication of thin film lenses.— Opt. Commun., 1972, v. 5, N 4.
2. 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.
3. Damman H. Blazed synthetic phase only holograms.— Optik, 1970, Bd 31, H1.
4. Левин В. Я., Соскин С. И. Монохроматическая функция рассеяния точки киноформного объектива.— Опт. и спектр., 1984, т. 56, вып. 1.
5. Ленкова Г. А. Киноформы. Синтез фазовой структуры и допустимые погрешности. Новосибирск, 1979. (Препринт АН СССР, Сиб. отд-ние, ИАПД; 98).

Поступила в редакцию 17 июня 1985 г.

УДК 535.4 : 778.38

В. Я. ЛЕВИН, В. И. НАЛИВАЙКО, И. С. СОЛДАТЕНКОВ,
С. И. СОСКИН, Ю. И. ЮРЛОВ
(Новосибирск)

ОДНОКОМПОНЕНТНЫЙ АХРОМАТИЗИРОВАННЫЙ СВЕТОСИЛЬНЫЙ КИНОФОРМНЫЙ ОБЪЕКТИВ С КРУГОВЫМ КОРРЕКТОРОМ АБЕРРАЦИЙ

В работе [1] сообщалось о создании однокомпонентного киноформного объектива (КО) рефракционно-дифракционного типа с линейным многоуровневым корректором (К) сферической аберрации. Объектив обеспечивал практически полное исправление монохроматических абер-

раций по направлению, перпендикулярному линиям структуры киноформного рельефа, и тем самым формирование узкой линии в фокальной плоскости, что подходит для ряда применений. На подобной основе возможно создание высококачественных КО для формирования изображения точечного источника или изображения произвольного объекта с дифракционным разрешением, однако при этом необходимы К с круговой топологией зон. Первая задача является более простой, так как к формирующим объективам по уровню фона обычно предъявляются менее высокие требования, чем к отображающим. Последнее важно из-за наличия у КО фона, обусловленного квантованием фазы киноформного рельефа [2].

Формирующие КО нужны для ряда задач. В связи с наличием в диапазоне 600—1300 нм достаточно малогабаритных и высокоэффективных источников излучения (светодиоды, полупроводниковые и газовые лазеры) с узкой относительной шириной линии излучения ($\Delta\lambda/\lambda = 10^{-6} - 10^{-4}$) представляется перспективным создание формирующих КО для геодезических дальномеров, автоколлиматоров и других контрольно-измерительных приборов, для бытовых лазерных видео- и звукопроигрывателей, а также для различных малогабаритных устройств хранения и обработки информации.

В данной работе сообщается о создании однокомпонентного формирующего КО с относительным отверстием 1:1,65, световым диаметром 60 мм, ахроматизированного в относительном спектральном диапазоне $\Delta\lambda/\lambda \approx 0,05$. Дифракционное качество обеспечено в угле поля зрения $20'$.

Конструктивно разработанный объектив представляет склейку, состоящую из плосковыпуклой линзы и корректора, выполненного на внешней стороне плоскопараллельной подложки. Киноформный рельеф изготовлен, как и в [3, 4], методом химического травления. Возможность создания киноформного объектива с указанными характеристиками обоснована в [4], где определены зависимости абберационных характеристик от поля зрения, апертуры и спектрального диапазона КО. Данный однокомпонентный КО является частным случаем рассмотренных в [4] двухкомпонентных КО. Как и в [4], К обеспечивает исправление сферической волновой aberrации рефракционной части КО (линзы и подложки К) до величины $\lambda/2M$, где M — число уровней квантования фазы К. Кроме того, киноформный корректор компенсирует хроматизм положения тех же элементов. Таким образом, для центра поля нескомпенсированным остается сферохроматизм, который и ограничивает диапазон ахроматизации КО.

Процесс разработки и изготовления КО включает следующие стадии:

1) расчет и оптимизация поперечных лучевых aberrаций КО, расчет топологий зон К и комплекта фотошаблонов (ФШ), необходимых для изготовления К (расчет проводился на ЭВМ М-4030 с использованием специализированного программного обеспечения);

2) вывод управляющих перфолент для изготовления ФШ;

3) автоматизированное изготовление комплекта согласованных фотошаблонов на круговом лазерном фотопостроителе (ЛФП) ИЛиЭ СО АН СССР с использованием в качестве светочувствительного материала халькогенидной пленки (ХСП), нанесенной на оптическую подложку;

4) изготовление хромированных ФШ копированием первичных халькогенидных фотошаблонов на установке совмещения и экспонирования;

5) изготовление деталей рефракционной части КО — линзы и кварцевой подложки К — на стандартном оборудовании оптической промышленности;

6) создание многоуровневого киноформного рельефа на кварцевой полированной подложке с применением процессов фотолитографии и химического травления в полирующем растворе, при этом производилось последовательное контактное экспонирование каждого из ФШ на фото-

резист типа РН-7, нанесенный в качестве маскирующего покрытия на подложку К (экспонирование осуществлялось на той же установке совмещения, травление — в специальном термостате);

7) центровка и склейка деталей КО — линзы и корректора — на специализированной установке, обеспечивающей контроль аберрационного качества КО в процессе склейки;

8) контроль и исследование характеристик оптических деталей КО и объектива в целом, проводившиеся с использованием стандартных приборов и специализированных установок.

Специализированное программное обеспечение для расчета основано на использовании формул Федера для расчета аберраций дифракционной части КО [5] и формул Оффнера [6] для расчета хода лучей через киноформную поверхность. Для управления процессом изготовления фотошаблонов на ЛФП использовались перфоленты, содержащие информацию о топологии ФШ, а также о двух реперных окружностях, расположенных вне светового поля К и обеспечивающих возможность контроля точности совмещения ФШ при изготовлении киноформного рельефа. В [7] сообщалось об изготовлении фотошаблонов для данного КО.

В [8] приведены основные характеристики ЛФП и описан процесс изготовления на нем фотошаблонов киноформных элементов. В данном случае выбор ХСП для записи на ЛФП первичных фотошаблонов связан с тем, что пленка ХСП позволяет производить запись излучением довольно маломощного, надежного гелий-неонового лазера ($\lambda = 633$ нм). Кроме того, шаблоны на ХСП при высоком контрасте копируются на более прочном носителе, например хrome, на стандартных установках экспонирования. Высокая контрастность при копировании обусловлена высоким коэффициентом поглощения (10^5 см⁻¹ и более) для большинства халькогенидных стекол в синей и ультрафиолетовой областях спектра.

При записи первичных фотошаблонов с достаточно резкими краями зон следящая система радиального позиционирования лазерного фотопостроителя обеспечивала достаточно малую дискретность перемещением луча по радиусу пластинки $\delta \approx 1$ мкм. Типичное время экспонирования при изготовлении первичного фотошаблона на ЛФП составляло 20—40 мин. Экспонированную лазерным лучом пластинку подвергли дальнейшей обработке в жидком травителе. При химическом травлении проявлялись окна в экспонированных участках пленки ХСП, чем и завершался процесс изготовления первичных ФШ. После копирования на хром эти ФШ использовали для изготовления киноформного рельефа методом многоуровневого химического травления. Основные технологические операции по изготовлению рельефа приведены в [1, 3]. Остальные операции по созданию КО достаточно просты или стандартны и не требуют специальных пояснений.

Рассмотрим практические результаты работы. Графики расчета аберраций и топологии корректора отражены на рис. 1, на котором

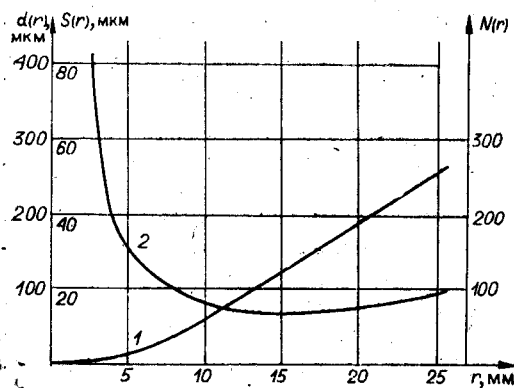


Рис. 1. Распределение волновой аберрации 1 и размеров зон и ступенек 2 по апертуре корректора для КО.

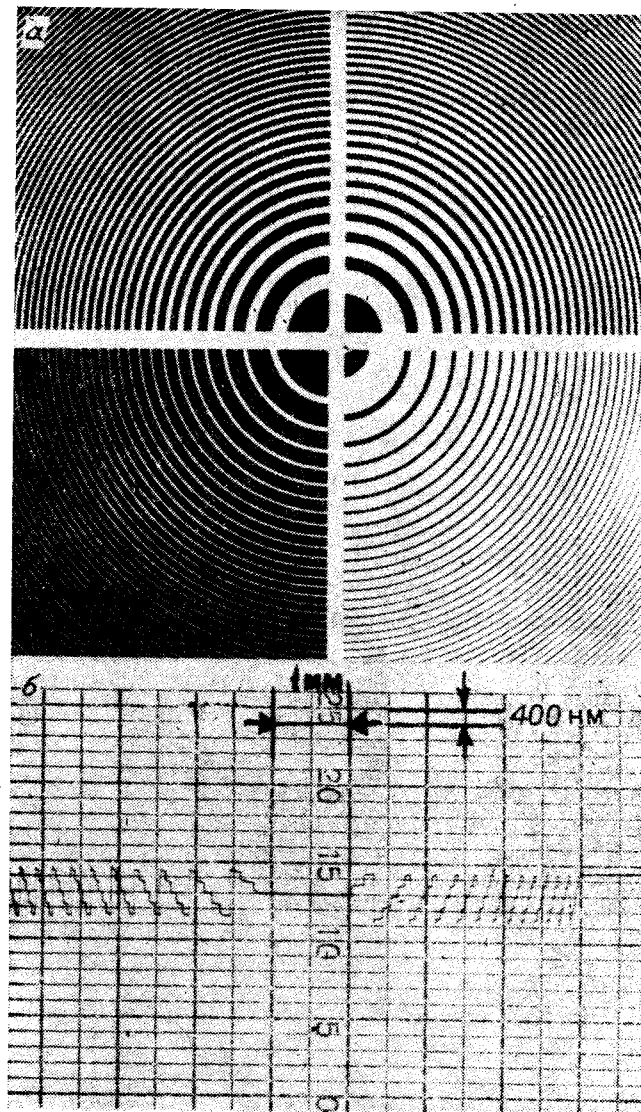


Рис. 2. Фрагменты комплекта согласованных фотошаблонов кругового корректора aberrаций (а) и профилограммы рельефа корректора (б).

показаны распределение по радиусу r световой апертуры К волновой aberrации $N(r)$, вносимой в КО корректором, а также распределение локального периода $d(r)$ и ширины ступенек $S(r)$ киноформного рельефа. Aberrация $N(r)$, выраженная в длинах волн (для центра спектрального диапазона КО), равна по величине и противоположна по знаку волновой aberrации рефракционной части КО. Наибольшее значение $N_{\max} = 256$ одновременно определяет количество темных (светлых) круговых зон на каждом из четырех фотошаблонов. Общее количество зон на К при этом равно $N_{\max} M = 256 \cdot 5 = 1280$. Минимальная ступенька ФШ и К равна $S_{\min} = 13$ мкм и соответствует участку К радиусом $r = 17$ мм. При этом кольцевая зона К, соответствующая S_{\min} , определяет, очевидно, зону с максимальной лучевой aberrацией, где ошибки расчета и изготовления К сказываются в наибольшей степени на оптическом качестве КО. Фрагмент центральной части изготовленных четырех ФШ с согласованной топологией дан на рис. 2, а, а фрагмент профилограммы К, зарегистрированной на профилографе ME-10, показан на рис. 2, б. Из рис. 1, 2 видно, что структура К и ФШ достаточно сложна и практически может быть создана только

Погрешность радиусов зон фотошаблонов

Номера шаблонов	Номер зоны	Расчетный радиус зоны r , мкм	Погрешность Δr , мкм	Номера шаблонов	Номер зоны	Расчетный радиус зоны r , мкм	Погрешность Δr , мкм
1	100	13 193	-1,6	3	100	13 222	+1,1
	200	20 258	-1,4		200	20 286	-0,8
	256	24 866	+0,3		256	24 865	+0,4
	Репер 1 Репер 2	26 000 26 020	-0,8 -1,0		Репер 1 Репер 2	26 000 26 020	-0,9 -0,5
2	100	13 207	-0,7	4	100	13 236	-0,9
	200	20 272	-0,2		200	20 303	-1,2
	256	24 845	+0,3		256	24 884	+0,5
	Репер 1 Репер 2	26 000 26 020	-0,7 -1,2		Репер 1 Репер 2	26 000 26 020	-0,3 -0,9

при помощи управляемой от ЭВМ установки для изготовления ФШ, какой и является лазерный фотопостроитель. Необходим также контроль К на всех этапах его изготовления.

Изготовленные фотошаблоны контролировались непосредственно на ЛФП с помощью интерферометра ЛФП при остановленном шпинделе (точность 0,1 мкм). Результаты измерений погрешностей радиусов по трем зонам световой апертуры и двум реперным окружностям, нанесенным вне световой апертуры, приведены в таблице, из которой видно, что точность изготовления зон первичных шаблонов не хуже 1,6 мкм, что вполне достаточно для синтеза К.

С целью определения работоспособности К контролировались следующие параметры: 1) ошибки топологии (нерезкость однократного края ΔS_1 и края совмещения ΔS , ошибки совмещения при изготовлении К методом многократного экспонирования ФШ; 2) ошибки глубины травления Δh ; 3) распределение по апертуре К дифракционной эффективности η_{-1} в рабочем порядке дифракции.

Измерения нерезкости края проводились на биологическом микроскопе, а глубины профиля — на интерференционном микроскопе с увеличением $300\times$. Нерезкость края совпадала с измеренной в [1] и составляла $\Delta S_1 < 1$ мкм, $\Delta S \approx 2$ мкм на участках, где было реализовано хорошее совмещение структуры. Ошибка суммарной глубины 5%.

Измерение дифракционной эффективности η_{-1} осуществлялось с целью определения влияния ошибок профиля киноформного рельефа на энергетику К. При этом регистрировалось распределение η_{-1} по апертуре К при сканировании последнего узким пучком полупроводникового лазера (ПКГ). Лазер имел нестабильность мощности $\pm 3\%$ и излучал в спектральном диапазоне ($\Delta\lambda = 4$ нм), лежащем в пределах рабочего спектрального диапазона КО.

Визуализация пучка при юстировке проводилась с помощью двухкамерного ЭОПа. Излучение ПКГ коллимировалось стандартным микрообъективом $10\times$, центральная часть пучка ($\varnothing 2,2$ мм) выделялась диафрагмой и направлялась на корректор. Дифрагированный на рельефе К пучок регистрировался ФЭУ-83. Смещение К по азимуту или радиальной координате производилось путем вращения К или его перемещения относительно регистрирующей оптической системы. Результаты распределения η_{-1} даны на рис. 3 для образца К с наибольшими ошибками совмещения. В приведенных графиках η_{-1} определена как отношение мощностей дифрагированного и падающего на К пучков и включает таким образом френелевские потери на отражение (8%). Азимутальное распределение

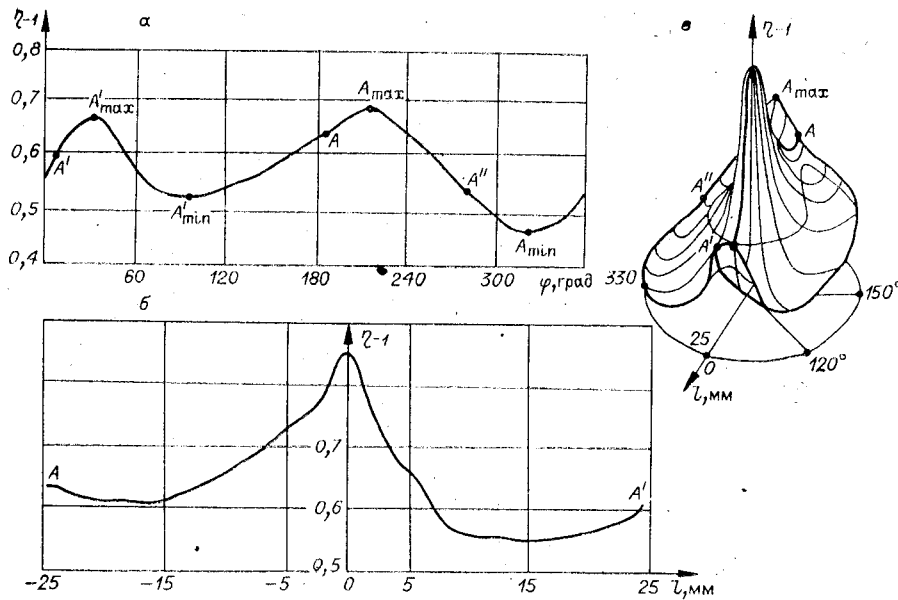


Рис. 3. Результаты распределения η для образца КК с наибольшими ошибками совмещения:
 а — азимутальное распределение $\eta(\varphi)$; б — распределение η по диаметру; в — распределение η по всей световой апертуре.

$\eta_{-1}(\varphi)$ (рис. 3, а) зарегистрировано вблизи края световой апертуры ($r = 23$ мм), где ширина ступеньки рельефа S близка к минимальной (см. рис. 1). Значения η_{-1} изменяются от 68 до 48%. Здесь отмечены точки A_{\min} , A'_{\min} , A_{\max} , A'_{\max} , соответствующие экстремумам $\eta_{-1}(\varphi)$. Кривая распределения η_{-1} по диаметру (рис. 3, б) также несимметрична и имеет минимум на участках, соответствующих по рис. 1 максимальной пространственной частоте.

По графикам рис. 3, а, б можно воспроизвести график рис. 3, в, качественно отражающий распределение η_{-1} по всей световой апертуре. Видно, что распределение $\eta_{-1}(r, \varphi)$ достаточно сложно. Его несимметрия отражает одновременное влияние всей совокупности погрешностей профиля на энергетiku К.

Для определения того, в какой степени значения η_{-1} коррелируют с погрешностями профиля К, в точках экстремумов η_{-1} (см. рис. 3, в) проводились замеры ширины S_m и глубины ступенек профиля h . Последняя затем пересчитывалась в величину фазового сдвига, вносимого соответствующими ступеньками рельефа в световой пучок, проходящий через К. Далее результаты обмеров реального профиля вводились в ЭВМ для расчета дифракционной эффективности К по специально разработанному для этого алгоритму и программе. При этом выяснилось, что график дифракционной эффективности $\eta(\varphi)$ хорошо коррелирует с распределением по световой апертуре ошибок рельефа, связанных преимущественно с ошибками совмещения фотонаблюдений при изготовлении корректора. Вторым фактором является эллиптичность круговых зон фотонаблюдений, вызванная, по-видимому, биением шпинделя лазерного фотопостроителя. В максимумах $\eta(\varphi)$ ошибок совмещения практически нет, по крайней мере они не поддаются визуальной регистрации, и снижение эффективности связано с потерями энергии на краях травления за счет самого процесса. Изучение радиального хода ошибок совмещения (см. рис. 3, б) показало, что последние меняются при постоянном азимутальном угле φ незначительно.

Путем интегрирования эффективности η_{-1} по световой апертуре К

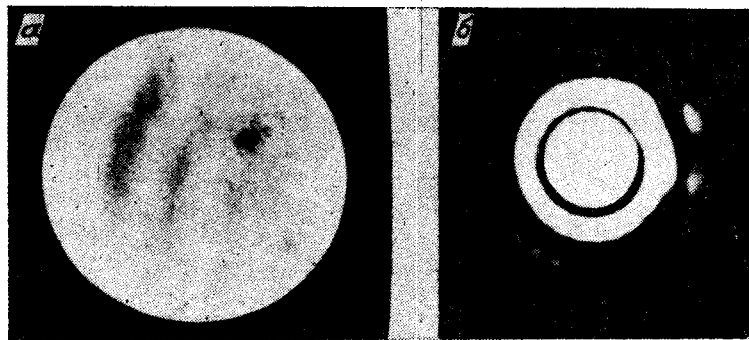


Рис. 4. Изображение точечного источника:
 а — без кругового корректора; б — с круговым корректором.

можно определить усредненную эффективность η_{-1cp} . Для данного образца К $\eta_{-1cp} = 59\%$ или с учетом возможности исключения френелевских потерь $\eta_{-1cp} = 64\%$. По той же методике был измерен образец К, характеризующийся минимальной ошибкой совмещения, равной 2,3 мкм. В этом случае η_{-1cp} с френелевскими потерями и без них составило 64 и 70% соответственно. Эти данные совпали с результатом непосредственного измерения η_{-1cp} при освещении всей апертуры К световым широким пучком полупроводникового лазера ($\eta_{-1cp} = 68 \pm 2\%$). По дифракционной эффективности η_{-1cp} К с круговой структурой оказались на 10% хуже, чем корректоры с линейной структурой по [1], что связано с недостаточной хорошо отработанной техникой совмещения круговых структур применительно к стандартным установкам совмещения и экспонирования.

Исследование качества разработанных КО производилось по изображению точечного источника на оптической скамье ОСК-3 с использованием коллиматора с фокусным расстоянием 1000 мм и в качестве тест-объекта — диафрагмы 10 мкм с угловыми размерами меньше угла дифракции исследуемого объектива. Изображение диафрагмы, сформированное КО, увеличивалось микрообъективом, визуализировалось двухкамерным ЭОПом и фотографировалось. Разрешение ЭОП в центре поля (20 лин./мм) было достаточно для качественного воспроизведения увеличенной точки КО. Для проверки аберрационного качества использовались полупроводниковые лазеры указанного выше типа с длинами волн, лежащими на краях рабочего спектрального диапазона объектива.

На рис. 4 показаны изображения точечных источников. Здесь а — изображение, зарегистрированное через рефракционную часть объектива, включающую, как отмечалось, линзу и кварцевую подложку той же толщины, что и подложка К, но без киноформного рельефа. Изображение сфотографировано в плоскости коррекции аберрации КО; б — изображение того же точечного источника через КО, полученное путем замены кварцевой пластинки на К. Эффект коррекции аберрации весьма значителен, исходные волновые аберрации в 285 длин волн (см. рис. 1) практически полностью исправлены. Диаметр точки уменьшился практически до дифракционного предела, составляющего (по центру первого темного кольца) 3,5 мкм. Судя по субъективной оценке четкости первого дифракционного кольца по отношению к идеальной дифракционной картине остаточная сферическая аберрация в пределах апертуры КО не превышает длины волны. Визуальные измерения той же точки по окуляр-микрометру дали размер диска Эйри 4 мкм. В то же время диаметр минимального пятна до коррекции составлял 0,980 мм, что согласуется с результатами расчета поперечных аберраций рефракционной части объектива. Таким образом, коэффициент коррекции, определяемый как отношение диаметров нескорректированной и скорректированной точек, равен 250. Качество точки существенно не ухудшалось в диапазоне углов поля зрения 20'. Можно заключить, что в результате работы создан формирующий кино-

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 высокоразрешающие 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-