

ются для данного случая так же, как (12) и (13), и имеют вид

$$r \leq [f l_1 l_2 \lambda / (2(l_1 - l_2) \sin \gamma \cdot \cos^2 \gamma)]^{1/3}; \quad (22)$$

$$k \leq \left(\frac{l_1^2 l_2^2 \cos^2 \gamma}{32 f (l_1 - l_2)^2 \sin^2 \gamma} \right)^{1/3}. \quad (23)$$

При $l_1 = \infty$ (22) и (23) переходят в (12) и (13), при $l_1 = l_2$ параметры r и k имеют неограниченные значения.

Все выводы и рекомендации, сделанные относительно применения приближенных формул в расчетах топологии зон наклоненного киноформного элемента при фокусировке параллельного пучка света, верны также для изображения точечного источника в точечный. Однако в последнем случае общий вид зависимости между параметрами элемента, которая должна применяться для расчета светосильных элементов, чрезвычайно усложняется и здесь не приводится. В принципе эта зависимость может быть получена решением уравнения (18) относительно r .

ЛИТЕРАТУРА

1. Коронкевич В. П. и др. Киноформные оптические элементы: методы расчета, технология изготовления, практическое применение.— Автотметрия, 1985, № 1, с. 4—25.
2. Ленкова Г. А. Киноформы. Синтез фазовой структуры и допустимые погрешности.— Новосибирск, 1979. (Препринт АН СССР, Сиб. отд-ние, ИАиЭ; 98).

Поступила в редакцию 7 мая 1985 г.

УДК 535.4 : 778.38

В. П. ПЕТРОВ, И. С. СОЛДАТЕНКОВ, С. И. СОСКИН

(Новосибирск)

ДЛИННОФОКУСНЫЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ КИНОФОРМНЫЕ ЛИНЗЫ ДЛЯ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Изготовление высококачественной цилиндрической оптики традиционными способами полировки стекла является сложной технологической задачей. Применение киноформной оптики позволяет упростить технологию изготовления цилиндрической оптики, предназначенной для работы с монохроматическими источниками излучения, а также в ряде случаев улучшить ее технические характеристики. Цилиндрические киноформные элементы могут эффективно применяться в различных системах, в частности в технологических устройствах фотолитографии, автоколлиматорах, оптоэлектронных системах хранения и обработки информации, спектральных и проекционных приборах. Возможность замены традиционных линз киноформными в значительной мере определяется характеристиками последних, в частности дифракционной эффективностью (ДЭ) в рабочем порядке дифракции, разрешающей способностью и уровнем светорассеяния.

Таблица 1

Тип линзы	Световые размеры, мм	Фокусное расстояние, мм	Тип профиля	Число уровней квантования фазы	Ширина наибольшей ступеньки, мкм	Ширина наименьшей ступеньки, мкм
Внеосевая	32×32	8000	Рис. 1, а	5	1730	14,6
Осевая	32×32	2000	Рис. 1, б	4	1590	20

Рис. 1. Алгоритмы разбиения на ступеньки:

а — внеосевая линза; б — осесимметричная линза; φ — фазовый сдвиг, вводимый ступеньками в проходящем свете; c — оптическая ось киноформных линз.

В данной работе представлены результаты исследования двух типов длиннофокусных киноформных цилиндрических линз для работы с параллельным монохроматическим пучком света, ступенчатый профиль которых выполняется химическим травлением в кварцевой подложке [1, 2].

Расчетная топология зон обеспечивала отсутствие сферической aberrации для бесконечно удаленного объекта на длине волны $\lambda_0 = 633$ нм. Характеристики линз приведены в табл. 1.

Алгоритм образования ступенчатого фазового профиля линз показан на рис. 1. Горизонтальные эквидистантные линии используются для формирования профиля линз, а также аппроксимирующих фронтов. Причем пунктирные линии определяют положение краев ступенек, а сплошные — фазовые уровни. Видно, что алгоритм для осевой линзы не отличается от общепринятого с числом уровней фазы $M = 4$ и фазовой глубиной ступеньки $\Delta\varphi = 2\pi/M$. Для внеосевой линзы с $M = 5$ $\Delta\varphi$ тоже равно $2\pi/M$, однако число ступеней в каждом периоде составляет $M + 1$, и, таким образом, фаза на крайних ступеньках периода отличается на 2π . Поэтому крайние ступеньки при монохроматическом освещении образуют ступеньку, эквивалентную $\varphi(\lambda_0) = 0$, шириной, равной их сумме. Таким образом, для λ_0 киноформ внеосевой линзы аналогичен элементу с разбиением по рис. 1, б при $M = 5$. Киноформные линзы изготавливались методом химического травления плавленного кварца с использованием комплекта взаимно согласованных фотошаблонов, полученных на микрофотонаборной установке [2]: трех шаблонов для осевой и пяти — для внеосевой линзы.

Исследования оптических характеристик киноформных линз проводились по схеме рис. 2. Здесь предусмотрены возможности исследования киноформных элементов в узких и широких пучках. Телескопическая система Т предназначена для получения широкого пучка, когда апертура киноформа освещается полностью. При исследовании в узких пучках Т отсутствует. Диффрагма определяет световую апертуру киноформной линзы в первом случае и фильтрует лазерный пучок — во втором; Z_1 и Z_2 — поворотные зеркала. При установке Z_2 на подвижный столик осуществляется сканирование киноформного элемента пучком заданной ширины. Линза с фокусным расстоянием 1000 мм предназначена для пе-

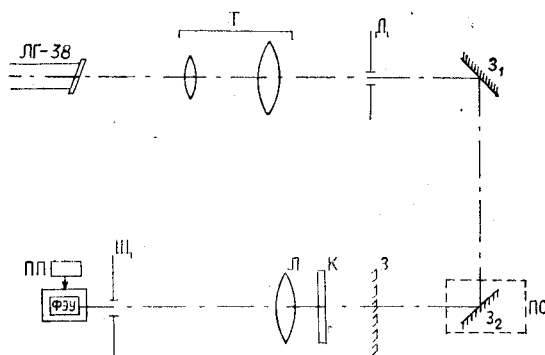
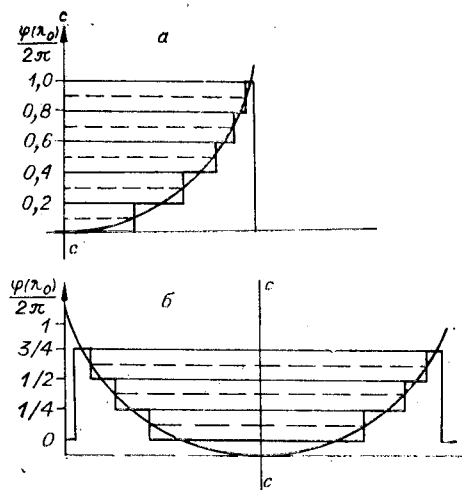


Рис. 2. Схема исследования киноформных линз:

ЛГ-38 — ОКГ непрерывного излучения на $\lambda = 0,6328$ мкм; Т — съемная телескопическая система; Д — круглая (нерегулируемая) или прямоугольная (регулируемая) диффрагма; Z_1 и Z_2 — зеркала; К — киноформная линза; Л — линза; ПФУ — устройство регистрации; ПП — подвижная платформа; Z — съемное зеркало; ПС — подвижный столик.



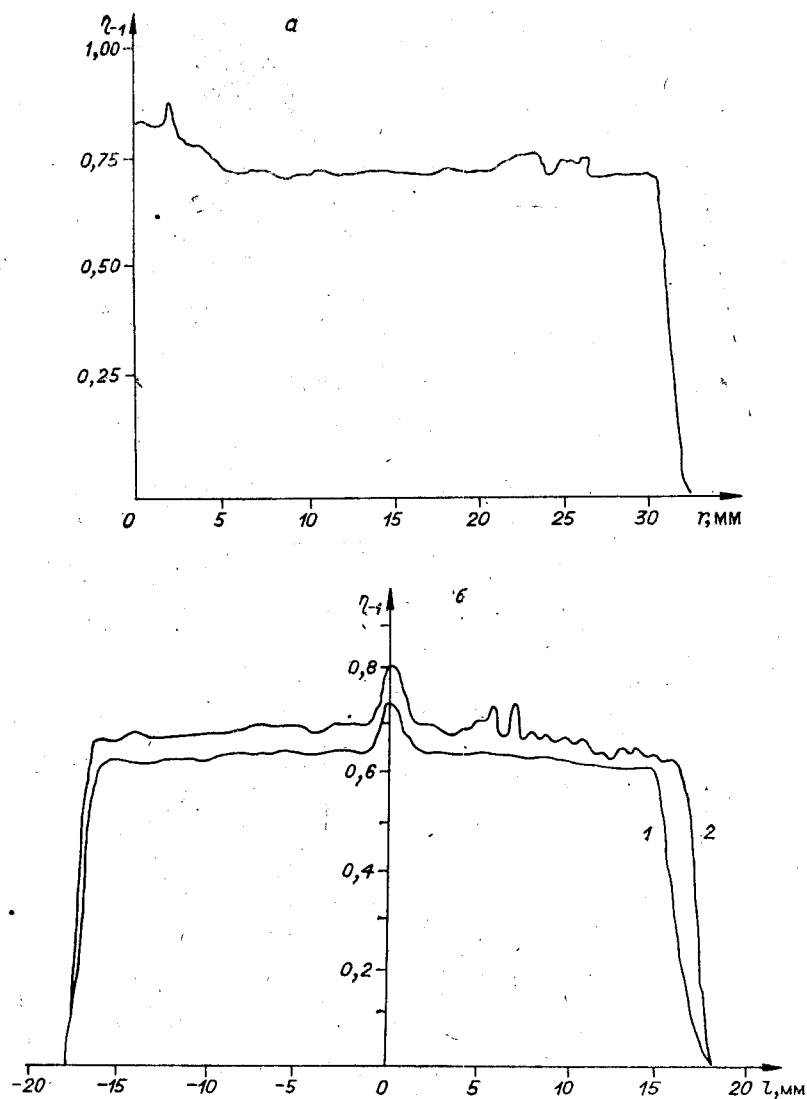


Рис. 3. Распределение η по апертуре для внеосевой (а) и осевой (б) линз.

ренесения плоскости фокусировки световых пучков в различных дифракционных порядках на расстояния, удобные для регистрации.

Распределение интенсивности в узком пучке соответствует гауссовому с точностью 5% размером 2,2 мм (по уровню e^{-2}), а в широком пучке — с точностью 20%.

Дифракционная эффективность η в заданном l -м дифракционном порядке определялась как отношение мощности, дифрагировавшей в l -й порядок, к мощности, падающей на образец. Экспериментальные значения η сравнивались с расчетными [3]. При этом расчетные η умножались дополнительно на коэффициент $\tau = 0,92$, учитывающий потери на отражение.

Из измерений распределения дифракционной эффективности η_{-1} (для рабочего дифракционного порядка $l = -1$) по апертуре линзы можно получить информацию о качестве ее изготовления. Поскольку ошибки изготовления и совмещения шаблонов значительно проявляются в области наибольших пространственных частот, то следует ожидать снижение η_{-1} на участке киноформа с минимальными размерами ступенек. Для киноформных линз этот участок находится на одном из краев апер-

туры (для внеосевой линзы) либо на обоих краях апертуры (для осевой линзы).

Распределение η_{-1} для внеосевой линзы, полученное сканированием по образцу узкого пучка, показано на рис. 3, а. Условия регистрации соответствовали размеру щели ФЭУ (см. рис. 2), на 30% превышающему видимые размеры пучка в плоскости его фокусировки.

Как видно из рис. 3, а, распределение η_{-1} на большей части линзы равномерное и составляет 73%. Протяженность области с повышенной η_{-1} равна 5,4 мм, что соответствует трем периодам киноформной линзы. Зарегистрированное повышение η_{-1} на этом краю связано с недостаточным пространственным разделением пучков, приводящим к одновременной регистрации, наряду с пучком рабочего порядка, также пучка нулевого порядка, доля энергии которого возрастает по мере приближения к краю киноформа. При выходе сканирующего пучка на участок с крупной структурой измеренная эффективность приближается к уровню светопропускания образца (здесь 84%). В то же время для края с мелкой структурой η_{-1} падает в направлении выхода сканирующего пучка из апертуры киноформа. В этом случае пучок нулевого порядка не попадает на фотоприемник.

Распределение η_{-1} для осевой линзы, зарегистрированное при тех же условиях, что и для внеосевой, показано на рис. 3, б. Здесь с целью определения влияния на энергетику технологических погрешностей фотонаборной машины представлены два графика. Фотонабор проводился линиями, параллельными образующей изготавливаемой цилиндрической линзы при длине наборного элемента (3 мм), малой по сравнению с апертурой линзы. Из-за погрешностей позиционирования каретки имела место нестыковка линий около 2 мкм. Кривая 1 снята при помещении центра пучка и линии сканирования по центру зоны фотонаборной машины, а кривая 2 — при совмещении того же пучка и линии сканирования с линией стыковки зон фотонаборной машины.

Видно, что несовершенство стыковки несколько снижает эффективность. Кроме того, заметен небольшой спад эффективности к краям линзы, появление которого объясняется ошибками совмещения при многоуровневом травлении, более существенными для осевой линзы в связи с ее более мелкой структурой (см. табл. 1). Тем не менее влияние ошибок мало и эффективность на краю линзы достаточно высока ($\eta_{-1} = 65\%$).

Измеряя ДЭ при освещении широким пучком всей апертуры киноформа, можно определить среднюю энергетику киноформной линзы и отношение сигнал-фон. Как отмечалось в [4], фон квантования обусловлен влиянием нерабочих дифракционных порядков киноформного элемента. Измерения проводились с линзой в плоскости фокусировки измеряемого l -го порядка при размере щели, на 30% превышающем видимый размер измеряемого пучка для обеих линз при $l \leq 0$ (результаты приведены в табл. 2). Здесь же даны расчетные значения

Таблица 2

Номер порядка l	Эффективность, %	
	Эксперимент	Расчет
Осевая линза -1	67,7	$M=4$ 74
Внеосевая линза		$M=5$
0	0,04	0
-1	73,1	80,5
-2	0,06	0
-3	0,25	0
-4	0,22	0
-5	0,02	0
-6	0,75	2,2
-7	0,14	0

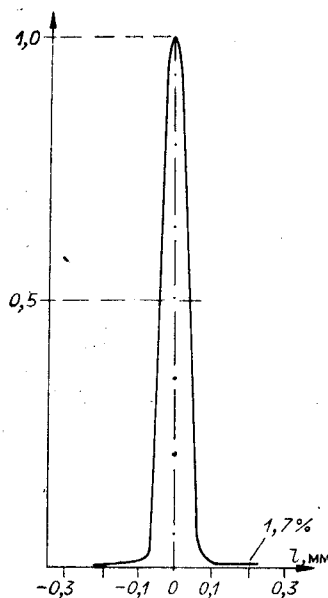


Рис. 4. Функция рассеяния линзы II.

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 внеосевой 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 aberrаций: 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 aberrации. Объектив обеспечивал практически полное исправление монохроматических aber-