

11. Eschler H., Weidinger F. Acousto-Optic Properties of Dense Flint Glasses.— J. Appl. Phys., 1975, vol. 46, N 1.
12. Izumitani T., Mosuda J. An Effect of Irradiation of As_2Se_3 Glass.— Ceramic Soc. Japan, 1974, N 5.
13. Lano T., Fukumoto A., Watanabe A. Tellurite Glass: a New Acousto-Optic Material.— J. Appl. Phys., 1971, vol. 42, p. 3674.
14. Шелопут Д. В. и др. Халькогенидное стекло. (Автор. свид-во № 370572.) — БИ, 1973, № 11.
15. Шелопут Д. В., Глушков В. Д., Туряница И. Д., Коперлиус Б. М. Халькогенидное стекло. (Автор. свид-во № 565892.) — БИ, 1977, № 27.
16. Зубринов И. И., Шелопут Д. В. Эффект акустотермической фокусировки лазерного луча в халькогенидных стеклах и прустите.— ФТТ, 1975, т. 17, с. 944.
17. Писаревский Ю. Оптико-акустическое взаимодействие в кристаллах каломели и бифталатов щелочных металлов: Автореф. на соиск. учен. степени канд. физ. наук. М.: изд. Ин-та кристаллографии, 1974.
18. Meitzler A. H. Piezoelectric Transducer Materials and Techniques for Ultrasonic Device Operating above 100 MHz.— In: Ultrasonic Transducer Material/Ed. O. E. Matiat. New York: Plenum, 1971.
19. Авдиенко К. И., Семенов В. И., Шелопут Д. В. Зависимость пьезоэлектрических свойств и характеристик ультразвуковых преобразователей от направления среза в кристаллах иодата лития.— В кн.: ВИМИ РИПОРТ. № 5. М.: изд. ВИМИ, 1975.
20. Авдиенко К. И., Богданов С. В., Семенов В. И., Шелопут Д. В. Оптические, акустические и пьезоэлектрические свойства кристаллов иодата лития.— Известия АН СССР. Сер. Физика, 1977, т. 41, № 4.
21. Sheloput D. V., Avdienko K. I., Kidiyov B. J. Growth of α - $LiIO_3$ Crystals of High Piezoelectric and Optical Quality.— J. Cryst. Growth, 1977, vol. 42, p. 228—233.
22. Зиттиг, Кук. Метод изготовления и крепления ультразвуковых преобразователей, используемых в высокочастотных цифровых линиях задержки.— ТИИЭР, 1968, т. 56, вып. 8.
23. Шелопут Д. В., Рыбакова Л. А., Шелопут Т. А., Зубринов И. И. Материал для звукопоглотителей. (Автор. свид-во № 546006.) — БИ, 1977, № 5.

Поступила в редакцию 31 мая 1977 г.

УДК 535.4 : 778.38

В. В. ДОНЦОВА, Г. А. ЛЕНКОВА
(Новосибирск)

КИНОФОРМНАЯ ЛИНЗА ДЛЯ РАСТРА

В настоящее время актуальной является задача получения линзового растра, применяемого в фотолитографии для мультипликации изображений [1] и создания равномерного освещения [2]. Обычно линзовый растр изготавливается голографическим методом [3] или путем проецирования с уменьшением зонной пластинки Френеля [4, 5]. Теоретическая дифракционная эффективность этих методов не превосходит 30 и 40% соответственно.

В предлагаемой работе исследуется возможность получения короткофокусной киноформной линзы для растра путем проецирования с уменьшением специального полутонного фотошаблона, имеющего пропускание, близкое к профилю фазовой линзы Френеля. Теоретически дифракционная эффективность таких линз может составлять 100%. Фотошаблон представлял фотографию колец интерферометра Фабри — Перо в отраженном свете [6]. В нашем случае толщина интерферометра составляла 25 и 50 мм, при этом расположение колец в интерференционной картине соответствовало зонным пластинкам с фокусами $f_0 = 1800$ и 900 мм. Качество фотошаблонов исследовалось аналогично [7] и позволяло использо-

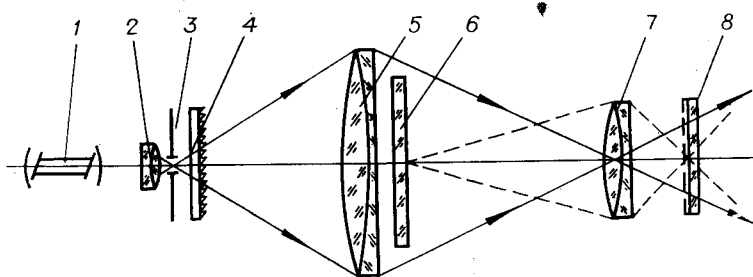


Рис. 1.

вать негативы диаметром 20—30 мм. При проецировании фотошаблонов с уменьшением в 10 раз можно было получить линзы с $f_{\text{л}} = 18$ и 9 мм и относительным отверстием 1:6 и 1:4,5. В качестве материала, на котором изготавливались линзы, применялись пленки халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП), нанесенные на стеклянные подложки.

Оптическая схема получения киноформной линзы приведена на рис. 1. Излучение аргонового лазера 1 ($\lambda = 0,515$ мкм) проходит через микрообъектив ($3\times$) 2 и диафрагму ($\varnothing 0,05$ мм) 3, установленную в его фокусе, и освещает конденсор 5 ($f = 250$ мм), непосредственно за которым помещен фотошаблон 6. Изображение последнего проецируется объективом (ОБ-410, $f = 65,8$ мм) 7 в плоскость халькогенидной пленки 8 с уменьшением в 10 раз. Изображение фотошаблона совмещалось с поверхностью пленки ХСП с помощью микроскопа. Для устранения когерентных шумов вблизи диафрагмы 3 устанавливался вращающийся рассеиватель 4. Фокусные расстояния объективов 5 и 7 выбирались так, чтобы размер изображения источника света на объективе 7 не превышал его диаметра и при этом обеспечивалось требуемое уменьшение фотошаблона. Проецирующий объектив, кроме того, имел апертуру и разрешение, достаточные для четкого изображения крайних зон фотошаблона. Ширина крайних зон после уменьшения составляла 7 и 6 мкм (160 лин/мм), что лежит в пределах разрешения объектива (~ 400 лин/мм).

Время экспозиции выбиралось таким, чтобы скачок фазы в зонах был равен 2π для длины волны $\lambda = 0,633$ мкм. В зависимости от условий эксперимента оно изменялось в пределах 1,5—15 мин. Правильность выбора экспозиции контролировалась по величине скачка фазы на линзах с помощью интерферометра Цендера — Маха. Результаты измерений (в долях 2π) приведены в табл. 1.

Для оценки качества киноформной линзы измерялись распределение света по всем дифракционным порядкам и доля рассеянного света при освещении линзы параллельным пучком гелий-неонового лазера. Свет, направляемый линзой в положительные, отрицательные и нулевые порядки, последовательно фокусировался дополнительным объективом в плоскость диафрагмы и регистрировался фотодиодом. При каждом измерении объектив смещался относительно киноформной линзы так, чтобы рабочий размер его апертуры сохранялся приблизительно постоянным. Этим исключалось влияние сферических aberrаций объектива на результат измерений. Доля энергии в каждом порядке определялась как отношение света, фокусирующегося в этом порядке, к свету, прошедшему через линзу.

Исследовано влияние мощности излучения лазера и условий эксперимента на качество записи линз. Параметры киноформных линз приведены в табл. 1. Анализируя данные таблицы, можно заметить, что наибольшая дифракционная эффективность η (34—36%) получена для линз с $f = 18$ мм в случае с вращающимся рассеивателем при мощности лазера 0,5 Вт. Для линз с одинаковым скачком фазы разброс в распре-

Таблица 1

Номер линзы	Фазовый скачок, 2λ	+1-й порядок η , %	Σ_+ , %	Σ_- , %	0-й порядок η , %	Рассеяние, %	+1-й порядок без учета рассеяния	Мощность лазера, Вт	Разрешение, \mathcal{R}			
									Расчетное, угл. с	По мифе, угл. с	В значениях, λ лин/мм	
$f\phi=1800$ мм, $f_l=18$ мм, $D_l=3$ мм									С вращающимся рассеивателем	51 (216 лин/мм)	48 48 51 48 51 48	231 216
1 ₁	0,9—0,5	36	4	16	34	10	40	0,5				
2 ₁	0,9—0,55	34	3	13	35	15	40					
2 ₂	0,9—0,55	34	2	12	40	12	39					
1	0,9—0,55	21	1	9	43	26	28	2				
2	0,9—0,7	30	1	10	37	22	38					
4 ₃	1—0,5	27	2	12	19	40	45	0,5				
4 ₄	1—0,75	30	1	14	11	44	54					
1 ₃	0,95—0,8	30	6	17	14	33	45	2				
4 ₀	0,92—0,7	27	2	7	32	32	40					
$f\phi=900$ мм, $f_l=9$ мм, $D_l=2$ мм									Без вращающегося рассеивателя	77 (286 лин/мм)	68 72	326 309
3 ₄	0,9—0,6	27	4	14	34	21	34					
4 ₂	0,9—0,6	30	3	9	31	27	41					
Растр 22×22 эл, $f_l=43$ мм, $D_l=2,7$ мм									Ионное травление	57	57	81
	0,5	30	5	43	18	4	—					

деления энергии по фокусам незначителен. Доля энергии, фокусируемая в положительных порядках, кроме первого (Σ_+), составляет не более 6%, в отрицательных (Σ_-) — 9—16%. Это свидетельствует о том, что форма профиля зон в этих линзах отличается незначительно. Сравнение линз, полученных при разных режимах записи, показывает, что с увеличением мощности лазера дифракционная эффективность линз несколько снижается при сохранении скачка фазы; линзы, записанные с вращающимся рассеивателем, имеют меньшее рассеяние и больший нулевой порядок, чем линзы, записанные без рассеивателя. Уменьшение рассеяния можно объяснить сглаживанием спекл-структуры проецируемой картины фотошаблона, а больший нулевой порядок тем, что скачок фазы в линзах, записанных с рассеивателем, существенно меньше 2λ . Возможно, нулевой порядок при скачке фазы, близком к 2λ , будет одинаковым независимо от режима записи. Следует отметить, что при записи линз с вращающимся рассеивателем, дающим несколько большую дифракционную эффективность, время экспозиции составляет 12—15 мин. При изготовлении линзового растра с большим числом элементов целесообразнее применять режим записи без рассеивателя, так как при этом время экспозиции снижается в ~ 10 раз.

Прямую зависимость качества линз от режима записи проследить трудно из-за различия в скачке фазы, вызванного частичной нестабильностью излучения лазера и недостаточной защищенностью установки от тряски и вибраций. Кроме того, картина усложняется из-за наличия у линз фокусов более высоких порядков, прямого и рассеянного света. Анализ качества линз по дифракционной эффективности без учета рассеян-

22 × 22 элемента, изготовленного на стекле методом ионного травления [5]. Зоны в линзах выполнены в виде одной прямоугольной ступеньки. Каждая линза фокусирует в +1-й порядок 30% энергии, остальная часть направляется в нечетные положительные и отрицательные фокусы и нулевой порядок. Качество линз сравнимо с качеством линз киноформного раstra, но, согласно теории [4], дифракционная эффективность их не может быть больше 40%.

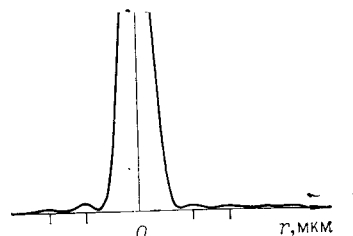


Рис. 2.

Определение разрешающей способности линз проводилось по стандартной мере № 5. Для увеличения углового размера штрихов меры использовался коллиматор с $f_k = 430$ мм. Из данных табл. 1 следует, что разрешение R изготовленных киноформных линз близко к дифракционному пределу.

Для исследования кружка рассеяния киноформной линзы, освещенной параллельным лазерным пучком, записывалось распределение интенсивности света в ее фокальной плоскости. Изображение точки в фокусе переносилось с увеличением в плоскость фотоумножителя с диафрагмой ($\varnothing = 0,1$ мм), который автоматически перемещался поперек изображения пятна. Сигнал с фотоумножителя поступал на записывающее устройство. Полученное распределение интенсивности света показано на рис. 2. В некоторых линзах наблюдалась несимметричная освещенность дифракционных колец, поэтому запись проводилась по двум взаимно перпендикулярным направлениям. В табл. 2 приведены усредненные значения относительных интенсивностей 1-го и 2-го дифракционных максимумов для киноформных и стеклянных линз с близкими параметрами. Из таблицы видно, что для киноформных линз распределение энергии в дифракционной картине близко к теоретическому распределению Эри, а для стеклянных — интенсивность в кольцах в 1,5 раза выше.

В заключение приведем сравнение качества короткофокусных линз для раstra, изготавливаемых различными способами (табл. 3). Киноформные линзы, полученные предложенным выше способом, имеют разрешение R , близкое к дифракционному пределу, и эффективность 30–35% (без учета рассеянного света 40–55%), которую можно повысить, улучшив качество фотошаблона и устранив рассеяние материала. Однако этот метод не позволяет реализовать линзы с относительным отверстием лучше 1:3, так как ограничены параметры самого фотошаблона [6]. Голографическим методом можно получить более светосильные линзы, но их разрешение несколько ниже теоретического, а эффективность составляет 20%. Разрешение дифракционных линз, изготавливаемых методом ионного травления, так же, как и ки-

Таблица 2

$f_{л},$ мм	$D_{л},$ мм	Дифракционные максимумы, %		
		I	II	I+II
		Теоретические значения		
		1,75	0,42	2,17

Киноформные линзы

18	2	1,6	0,8	2,4
18	3	1,6	0,4	2,0
9	3	2,8	0,5	3,3

Стеклянные линзы

16	3	2,9	0,75	3,65
8	3	4,1	1,3	5,4

Таблица 3

$f_{л}, \text{мм}$	$D_{л}, \text{мм}$	Рабочая $\lambda,$ мкм	Число зон	Минимальный размер зон, мкм	Расчетные значения		Эксперимент по миру		Визуально измеренное $r,$ мкм	Число элементов в растре
					Разрешение $\mathcal{R},$ угл. с	r кружка рассеяния, мкм	$\mathcal{R},$ угл. с	$r,$ мкм		
<i>Киноформные линзы</i>										
18	2	0,633	44	11,3	77	6,9	77	6,9	7,3	—
18	3	0,633	99	7,6	51	4,6	51	4,6	4,3	9×9
9	3	0,633	196	3,8	51	2,3	57	2,6	3,1	4×4
<i>Голографические линзы</i>										
15	5,2	0,546	410	3,2	27	1,9	—	3,5	—	13×13
15	7	0,546	738	2,3	19	1,4	—	1,7	—	39×39
<i>Дифракционные линзы</i>										
14,3	1×1	0,44	20	12,7	88	6,3	—	—	7,5	50×50
30	5,4	0,44	276	4,9	20	3,0	—	—	3,0	—
<i>Стеклопленочные линзы</i>										
8	3	—	—	—	51	2,1	81	3,2	3,0	—
8	2	—	—	—	77	3,1	91	3,6	3,6	32×32
7	3	—	—	—	51	1,85	76	2,7	3,2	—

ноформных, близко к теоретическому, а эффективность при одноступенчатом фазовом профиле зон приближается к 40% [5]. Теоретически при увеличении числа ступеней эффективность может быть увеличена. Однако многоступенчатое квантование значительно усложняет процесс изготовления линз и, кроме того, снижает предельно достижимую апертуру линз (из-за ограниченной разрешающей способности фотолитографического оборудования). В опубликованных данных не приводится экспериментального значения эффективности короткофокусных дифракционных линз более чем с одной ступенью квантования.

Авторы выражают признательность В. П. Коронкевичу за обсуждение результатов и полезные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ли С. Создание многократных изображений для интегральных схем с помощью голограмм Фурье.— ТИИЭР, 1968, т. 56, № 1.
2. Болотников В. А., Котлецов Б. Н., Соколовский М. Н., Фомина Р. И. Растровая осветительная система для проекционной и контактной фотолитографии.— Электрон. пром-сть, 1975, № 6.
3. Буйнов Г. Н., Кит И. Е., Мустафин К. С., Саврасова М. И. О мультиплицировании изображений с помощью одноосевых голограмм.— Опт. и спектр., 1974, т. 37, № 2.
4. D'Auria L. et al. Photolithographic Fabrication of Thin Film Lenses.— Opt. Comm., 1972, vol. 5, N 4.
5. Бобров С. Т., Туркевич Ю. Г. Дифракционные оптические элементы, изготавливаемые методами фотолитографии.— В кн.: Применение лазеров в системах преобразования, передачи и обработки информации. [Материалы семинара]. Л.: изд. ЛДНТП, 1978, с. 73—77.
6. Коронкевич В. П., Ленкова Г. А., Михальцова И. А. Киноформные линзы. Ч. I. Оптический метод получения фототаблона.— Автометрия, 1977, № 5.
7. Донцова В. В., Коронкевич В. П., Ленкова Г. А., Михальцова И. А. Киноформные линзы. Ч. II. Изготовление линз и исследование их оптических характеристик.— Автометрия, 1979, № 1.

Поступила в редакцию 2 марта 1979 г.