

**ФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ**

УДК 535.42 : 317.7

В. В. Донцова, Ю. А. Клевцов, В. П. Коронкевич, А. Г. Полещук

*(Новосибирск)***МИКРООБЪЕКТИВЫ С ДИФРАКЦИОННЫМ КОРРЕКТОРОМ
ДЛЯ ДИСКОВОЙ ПАМЯТИ**

Рассмотрены пять систем рефракционно-дифракционных микрообъективов для работы с оптическими дисками. Описывается растровая технология изготовления дифракционного корректора объектива. Изготовлен и исследован опытный образец микрообъектива с апертурой 0,55 для $\lambda = 0,78$ мкм.

К объективам для чтения, записи и стирания информации с оптических дисков предъявляются жесткие требования в отношении коррекции аберраций, технологичности конструкции и массы. В соответствии с принятыми в настоящее время стандартами [1] эффективное пятно рассеяния в плоскости изображения не превышает 1,6 мкм, что при $\lambda = 0,78$ мкм соответствует числовой апертуре $NA = 0,52—0,53$. Для исключения контактов с диском рабочий отрезок объектива должен быть по стандарту не менее 1,2 мм. Возможный разброс длины волны излучения в пределах партии полупроводниковых лазеров, не превышающий обычно ± 30 нм, необходимо скомпенсировать. Качество изображения не должно ухудшаться существенно при наклонах объектива или диска порядка $0,5—1^\circ$. Для нормальной работы систем автофокусировки и слежения за дорожкой масса объектива обычно не превышает 1 г при простой и технологичной конструкции, пригодной для массового производства. Указанные выше требования к апертуре и степени коррекции аберраций при выполнении в традиционном варианте приводят к 4-, 5-линзовой схеме объектива, которая по уровню сложности, габаритам и массе уступает дифракционным аналогам.

Цель предлагаемой работы — создание гибридного объектива с дифракционным корректором и разработка технологии его изготовления, пригодной для массового тиражирования.

Нами проведено компьютерное моделирование пяти возможных систем гибридных микрообъективов. Изготовлены и исследованы две из них. Разработаны и экспериментально опробованы две технологии изготовления дифракционного корректора, пригодные для массового тиражирования. В работе приводятся результаты исследования одного из объективов, предназначенного для считывающей головки накопителя магнитооптической памяти, разработанного в Институте автоматики и электрометрии СО РАН.

На рис. 1 изображены в сопоставимом масштабе пять исследованных нами схем дифракционных микрообъективов (штрихпунктирной линией обозначена киноформная поверхность дифракционного корректора), а в табл. 1 и 2 приведены соответственно технические характеристики и конструктивные параметры элементов. Толщина защитного стекла магнитооптического диска

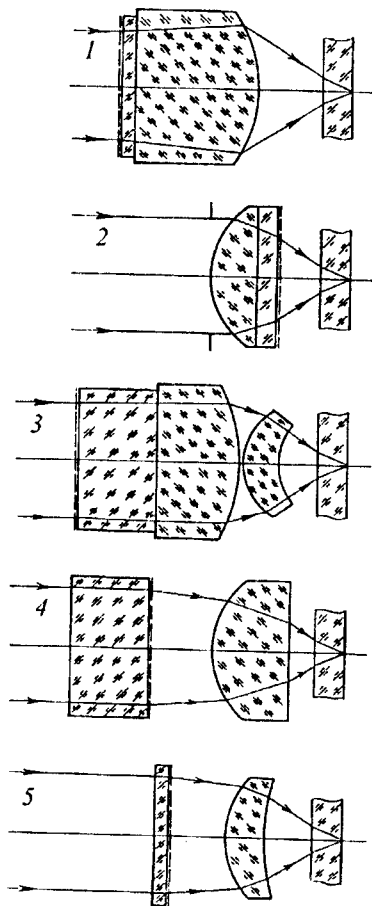


Рис. 1

по стандарту [1] выбрана равной 1,2 мм (стекло К8), рабочий дифракционный порядок везде +1.

Вначале была рассмотрена сравнительно простая однокомпонентная схема дифракционного объектива [2] (вариант 1 на рис. 1). С целью коррекции осевого хроматизма дифракционному элементу, который находится в центре кривизны сферической поверхности силового компонента, придается положительная оптическая сила. Наши исследования подобной системы с киноформной пластинкой показали, что при апертуре $NA > 0,5$ требуется силовой компонент из стекла с показателем преломления $n > 2$. Допустимая децентрировка киноформной пластинки составляет 1—1,5 мкм. Кроме того, объектив может работать лишь в узком диапазоне спектра ($\Delta\lambda = \pm 2$ нм). Достоинство этой схемы, состоящее в большом угловом поле и, следовательно, в малой чувствительности к возможным наклонным магнитооптическому диску, сводится на нет указанными недостатками.

Можно рассчитать объектив с обратной ориентировкой силового компонента и киноформной пластинки [3] (вариант 2 на рис. 1). Здесь дифракционный элемент исправляет существенно меньшую сферическую aberrацию силового компонента, что увеличивает период T и повышает технологичность ДОО, однако при этом не удастся обеспечить достаточно большое угловое поле, которое составляет всего 6—9°.

При уменьшении апертуры NA допуски на децентрировку киноформного корректора и спектральный диапазон объектива по варианту 1 расширяются, а частота и число дифрак-

Таблица 1

Технические характеристики дифракционных микрообъективов

Номер варианта схемы	NA	λ , нм	$\Delta\lambda$, нм	D , мм	f' , мм	s' , мм	ω' , угл. мин
1	0,54	780	2	4,3	4,05	2,52	30
2	0,56	825	4	4,5	3,76	1,70	9
3	0,55	780	7	4,5	4,09	1,54	30
4	0,55	780	1	4,5	4,07	1,01	30
5	0,55	780	1	4,5	4,07	1,88	30

Обозначения: NA — числовая апертура, λ — рабочая длина волны, $\Delta\lambda$ — допустимая полуширина полосы пропускания источника, D — диаметр входного зрачка, f' — фокусное расстояние, s' — рабочий отрезок, 2ω — угловое поле зрения в пространстве предмета.

Таблица 2

Конструктивные параметры микрообъективов

r_i , мм	d_i , мм	n_i	$D_{св}$, мм	Марка стекла	r_i , мм	d_i , мм	n_i	$D_{св}$, мм	Марка стекла
Схема 1					Схема 2				
		1					1		
∞^*			4,3		3,31			4,5	
	0,51	1,51075		К8		1,7	1,73582		ТФ5
∞			4,4		∞			3,9	
	4,738	2,12963		СТФ3		0,8	1,50986		К8
-5,248			5,0		∞^*			3,2	
		1					1		
Схема 3					Схема 4				
		1					1		
∞^*			4,5		∞			4,5	
	3,0	1,51075		К8		3,0	1,51075		К8
∞			4,6		∞^*			4,5	
	3,2	1,78668		ТФ10		2,448	1		
-6,427			4,6		3,6			3,9	
	0,1	1				3,0	1,78668		ТФ10
2,36			3,7		∞			2,3	
	1,35	1,78668		ТФ10			1		
2,36			2,6						
		1							
Схема 5					<p>Обозначения: r_i — радиусы кривизны поверхностей, d_i — толщины линз и воздушные промежутки, n_i — показатель преломления среды, $D_{св}$ — световые диаметры поверхностей. Знаком * помечена поверхность ДОЭ.</p>				
		1							
∞			4,5						
	0,5	1,51075		К8					
∞^*			4,5						
	2,209	1							
3,47			4,0						
	1,5	2,12963		СТФ3					
7,98			3,2						
		1							

ционных зон резко уменьшаются. Это наводит на мысль о том, что для разработки объектива заданной апертуры выгодней было бы применить двухкомпонентную схему (вариант 3, рис. 1), где положительный апланатический мениск увеличивает апертуру пучка в n раз (n — показатель преломления мениска). Таким образом, можно уменьшить апертуру дифракционно-рефракционного компонента в n раз со всеми вытекающими отсюда преимуществами в отношении допусков, спектрального диапазона, дифракционной эффективности, а также выбора стекла для силового компонента. Нами был рассчитан вариант такой схемы со следующими характеристиками: $NA = 0,553$, спектральный диапазон работы $\Delta\lambda = \pm 7$ нм, диаметр входного зрачка $D = 4,5$ мм, минимальное расстояние между соседними зонами дифракционного корректора $T = 35$ мкм (при общем количестве зон 41). Аберрации объектива исправлены настолько хорошо, что, вплоть до края углового поля $0,5^\circ$, качество изображения в указанном диапазоне спектра практически не отличается от дифракционного. Для пучка с равномерной интенсивностью по зрачку в пятне рассеяния диаметром 1,6 мкм содержится 82 % света. Фазовая функция киноформной поверхности корректора имеет вид:

$$\Phi(\rho) = \sum a_j \rho^{2j},$$

где a_j — коэффициент, а ρ — радиус зоны киноформного элемента. Расчетные параметры дифракционных корректоров и коэффициенты a_j для всех исследованных систем приведены в табл. 3.

Проведенные оценки допусков на параметры оптических деталей и их децентрировку подтверждают возможность реализации этой системы. Допустимое поперечное смещение киноформной пластинки и апланатического мениска с оси составляет соответственно 6 и 30 мкм. Суммарная масса оптических деталей не превышает 0,6 г. В объективе использованы обычные марки стекол: для киноформной пластинки К8, для силового компонента и мениска ТФ10.

Сравнительно недавно предложен новый тип двухкомпонентного дифракционного объектива [4] (вариант 4, рис. 1). В этом объективе киноформная пластинка и силовой элемент разделены значительным воздушным

Т а б л и ц а 3

Параметры дифракционных корректоров

Номер схемы	1	2	3	4	5
T , мкм	5,5	24	35	7	9
Число зон	113	42	41	181	142
j	Коэффициенты фазовой функции $a_j 10^{2j}$				
1	-3,5244700	-3,3000000	-1,1800000	-2,9456262	-2,3709259
2	35,548790	93,774690	9,4849349	4,4724190	3,2768482
3	380,82400	-236,33500	3,0535732	15,011280	0,4052208
4	-4460,6500	-11307,100	943,01790	-4,0124784	354,58879
5	136814,10	446411,50	-14368,143	1839,0347	-6207,0734
6	60000,000	-5939360,0	103464,40	-2772,8574	50459,953
7	-2200000,0				

О б о з н а ч е н и я: T — минимальный период структуры ДОО.

промежутком, что позволяет уменьшить кому и астигматизм децентрировки и существенно расширить допуски на сборку и юстировку объектива.

По схеме варианта 4 был рассчитан и изготовлен дифракционный объектив, который содержит киноформную пластинку и удаленный от нее на некоторое расстояние рефракционный компонент в виде плосковыпуклой линзы, установленной плоской поверхностью к диску. Внутренняя поверхность пластинки киноформная. Особенностью расчета подобной системы является достижение компромисса между расширением допусков на децентрировку и сужением спектрального диапазона. Одновременное исправление осевого хроматизма, комы децентрировки и обеспечение апланатической коррекции невозможно, поэтому схема была рассчитана для сравнительно узкой, но вполне достаточной для практики ширины спектра $\Delta\lambda = \pm 1$ нм с возможностью работы в диапазоне спектра ± 12 нм. Апланатическая коррекция в ней такова, что, вплоть до края углового поля $0,5^\circ$, качество изображения не отличается от дифракционного. В пятне рассеяния диаметром 1,6 мкм содержится 82,5 % света. Минимальное расстояние между соседними зонами киноформной пластинки составляет 7 мкм, при общем числе зон 181.

Масса оптических деталей объектива по варианту схемы 4 не превышает 0,5 г. За счет уменьшения влияния комы децентрировки допуски на смещение и поворот киноформной пластинки расширяются более чем вдвое относительно предыдущего варианта схемы 3 и составляют 0,015 мм и $6'$, однако толщина рефракционного компонента должна быть выполнена с точностью 0,05—0,1 мм.

Для изготовления дифракционного корректора была выбрана фоторастровая технология [5], которая позволяет получить ДОЭ с непрерывным фазовым профилем и достаточно высокой эффективностью, при этом отсутствует операция совмещения фотошаблонов, а частота структуры фазового профиля определяется только процессом литографии.

Известно [6], что при экспонировании позитивных резистов излучением с интенсивностью $I(\rho)$ толщина оставшегося после проявления слоя резиста равна

$$h_{\Phi(\rho)} = D_0 - cI(\rho),$$

где D_0 — толщина исходной пленки; c — коэффициент, учитывающий продолжительность экспозиции, проявления и другие параметры резиста; ρ — радиус зоны ДОЭ.

Если распределение интенсивности $I(\rho)$ пропорционально фазовой функции $\Phi(\rho)$, то в слое фоторезиста сформируется ДОЭ с функцией пропускания

$$T(\rho) = \exp[-ik(n-1)h_{\Phi(\rho)}] = \exp[-i\Phi(\rho)].$$

Фоторастровый метод позволяет получить полутоновой профиль в резисте с функцией пропускания, близкой к $T(\rho)$, за один технологический цикл с использованием серийного технологического оборудования. Для этого необходимо провести растривание полутонового изображения $U(\rho)$, соответствующего аргументу расчетной комплексной функции пропускания ДОЭ, для изготовления фотошаблона с бинарным пропусканием $B(\rho) = V[\Phi(\rho)]$, где V — оператор, преобразующий непрерывную функцию $\Phi(\rho)$ в бинарную $B(\rho)$, а затем выполнить экспонирование слоя фоторезиста через бинарный фотошаблон на фотолитографической установке, используя ее как фильтр, формирующий распределение интенсивности $I(\rho)$ в резисте, достаточно близкое к исходной функции $\Phi(\rho)$: $I(\rho) = B(\rho) * Q(\rho)$, где $Q(\rho)$ — импульсный отклик оптической системы при некогерентном освещении, * — операция свертки.

Принцип формирования рельефа с пилообразной формой показан на рис. 2. Процесс растривания может быть интерпретирован как процедура кодирования изображения. Эта процедура преобразует функцию (а) с пилообразным распределением фазы в бинарное изображение (b). Проекционная

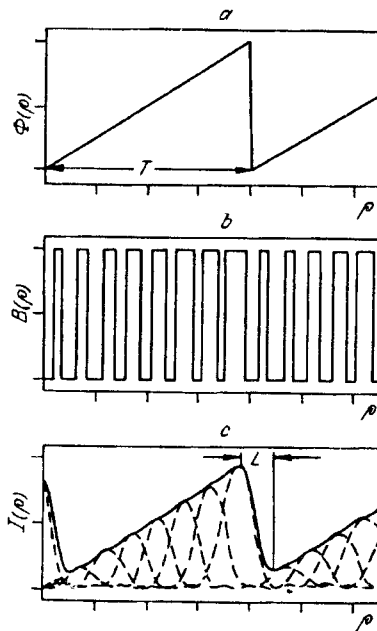


Рис. 2

мерами зон 100 мкм составит 98,5 %, а 5—7 мкм — соответственно 70—78,3 %.

Для дискретизации полутоновой функции $U(\rho)$ нами был выбран алгоритм широтно-импульсной модуляции [5]. Пространственная частота следования кольцевых зон раstra постоянна, а их ширина l (в двумерном случае площадь) пропорциональна значению кодируемой функции $\Phi(\rho)$ в точках дискретизации i :

$$l_i = T_d \{0,5 + P_m [(U(\rho) - iT_d) - 0,5]\}.$$

Здесь T_d — период дискретизации; $i = 1, 2, 3, \dots, m$ — номер кольцевой зоны раstra в пределах периода; $P_m = (l_{\max} - l_{\min}) / (l_{\max} + l_{\min})$ — глубина модуляции; l_{\max}, l_{\min} — максимальная и минимальная ширина импульсов за период функции $U(\rho)$. Фазовая функция центральной самой большой зоны корректора аппроксимировалась квадратичной функцией, а остальных — линейной.

Растринированный фотошаблон изготавливался в увеличенном масштабе (10:1) на круговом лазерном генераторе изображений (КЛГИ) по термохимической технологии [7] на стеклянной подложке, покрытой пленкой хрома. Уменьшение (1:10) изображения фотошаблона и его мультиплицирование (7×7) осуществлялись на стандартной установке проекционного экспонирования UER (объектив $NA = 0,35$). Минимальная ширина кольцевых зон раstra фотошаблона определялась пространственным разрешением КЛГИ и технологией записи (около 1200 лин./мм) и была выбрана равной 1—1,2 мкм. Период дискретизации T_d равнялся 6 мкм. Точность (среднеквадратичное значение) выполнения границ зон раstra составляла 0,1 мкм.

Микрорельеф дифракционного корректора формировался в слое фоторезиста ФП-051МК толщиной около 2 мкм, а затем реактивным ионно-лучевым травлением переносился в материал подложки. Глубина рельефа в фоторезисте определялась величиной экспозиции. Для получения необходимой глубины рельефа экспозиция в процессе мультипликации изменялась в небольших пределах при переходе от одного элемента к другому. На рис. 3 показаны профилограммы центральной части (а) дифракционного корректора

система формирует сглаженное распределение интенсивности в плоскости резиста (с). Конечный размер импульсного отклика объектива $Q(\rho)$ приводит к отличию профиля в резисте от исходной функции и ограничивает дифракционную эффективность ДОЭ. Импульсные отклики $Q(\rho)$ от каждой точки изображения накладываются друг на друга и усредняются. Дифракционную эффективность изготовленного таким образом ДОЭ можно оценить по формуле

$$\eta = (1 - 2L/T)100 \% = \\ = (1 - 1,22\lambda/T \cdot NA)100 \%,$$

где $L = 0,61\lambda/NA$ — величина обратного ската, который определяется полушириной импульсного отклика [6], T — период решетки, NA — числовая апертура проекционного объектива литографической установки, λ — длина волны экспонирования резиста. Коэффициент 2 введен в соответствии со скалярной теорией дифракции.

При изготовлении ДОЭ на установке проекционной литографии типа UER $\lambda = 436$ нм, $NA = 0,35$. При этом расчетная дифракционная эффективность ДОЭ с раз-

и его зон (*b*), имеющих минимальные размеры порядка 7 мкм. Видно, что форма зон близка к заданной (пилообразной).

Наибольшее значение дифракционной эффективности, полученное для изготовленных в стекле дифракционных корректоров диаметром 4,5 мм, составило 67 %. При ограничении диафрагмой диаметром 3 мм значение эффективности возрастает до 75,5 %.

Очевидно, что крайние зоны значительно снижают общую эффективность корректора. Напомним, что размер крайних зон составляет 7 мкм, а соответствующее им расчетное значение дифракционной эффективности — 78 %. Это позволяет надеяться, что повышение эффективности крайних зон возможно при улучшении технологии изготовления за счет более тщательного подбора режимов экспонирования и травления для достижения равномерности глубины и формы профиля по всему диаметру корректора.

Следует заметить, что недостаточно высокую эффективность киноформного корректора (67 %), применяемого в схеме изготовленного микрообъектива, можно частично компенсировать эффективным просветлением оптических поверхностей, что позволит повысить пропускание выбранной оптической схемы микрообъектива на 15—20 %.

Сборка опытного образца микрообъектива (вариант схемы 4) производилась обычным способом: его компоненты вклеивались в оправы, которые затем центрировались с помощью автоколлимационного прибора на токарном станке с биением шпинделя порядка 5 мкм. Для центрировки киноформной пластинки использовались блики первого и второго порядков дифракции. Качество центрировки контролировалось в параллельном пучке гелий-неонового лазера.

Исследование качества объектива осуществлялось по функции рассеяния точки (ФРТ) на установке, которая включала: полупроводниковый лазер (ИЛПН-210-2А) с длиной волны излучения $\lambda = 789$ нм, удовлетворяющей расчетным требованиям, коллиматорный объектив типа И-51 ($f = 210$ мм) для получения параллельного пучка, исследуемый объектив, микроскоп с микрообъективом $60\times$; $NA = 0,85$ для наблюдения и проецирования изображения точки, фотоприемник с микродиафрагмой и самопиसेц для записи распределения интенсивности в фокальной плоскости объектива.

Падающий параллельный пучок фокусировался исследуемым объективом на поверхность пластины толщиной 1,2 мм с показателем преломления $n = 1,51$, имитирующей защитное стекло магнитооптического диска. Изображение точки переносилось микроскопом с большим увеличением в плоскость микродиафрагмы с фотоприемником, последний перемещался по диаметру пятна рассеяния в горизонтальном направлении. Калибровка пятна рассеяния производилась по записи в аналогичных условиях шкалы объект-микрометра. В плоскости наилучшей фокусировки получены следующие экспериментальные значения ФРТ: размер пятна рассеяния по уровню первого минимума интенсивности $2p = 2,25$ мкм; по уровню интенсивности $1/e^2 - 2p = 1,62$ мкм; относительная интенсивность первого кольца 5,1 %. На рис. 4 приведены соответственно расчетная (*a*) и экспериментальная (*b*) функции рассеяния точки. Сравнение этих функций показывает, что качество изготовленного объектива соответствует расчету.

С целью дальнейшего улучшения конструктивных и технологических характеристик объектива была рассчитана схема (см. вариант 5, рис. 1) с вогнутой передней поверхностью.

В качестве материала рефракционного компонента использовано стекло СТФ3. Это дает возможность увеличить период дифракционной структуры до

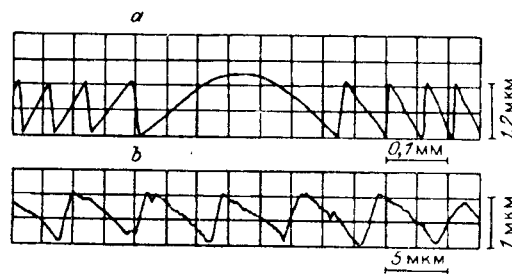


Рис. 3

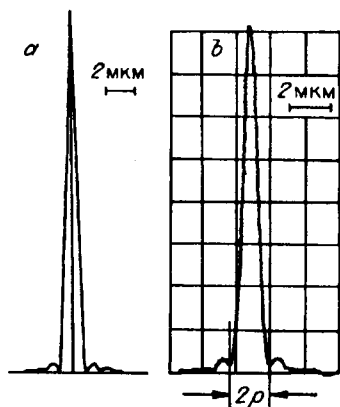


Рис. 4

9 мкм при снижении числа зон до 142; кроме того, анализ допусков на децентрировку элементов объектива показывает, что они еще в 1,5—2 раза шире, чем у аналога с плоской передней поверхностью, что достигается при меньшем промежутке между компонентами и почти в 2 раза большем рабочем расстоянии, при этом спектральный диапазон работы практически не изменяется. Расчет концентрации энергии показывает, что на оси микрообъектива в пятне рассеяния диаметром 1,6 мкм содержится 82,1 % света. Эта величина уменьшается при увеличении углового поля и для $0,5^\circ$ составляет 79,3 %. Общая масса оптических элементов, не превышающая 0,18 г, и меньшие габариты схемы позволяют довести суммарный вес объектива до 0,65 г.

При изготовлении дифракционного корректора для этого образца объектива оказалось возможным использовать стандартную технологию фотолитографии. Структура фазового профиля аппроксимировалась четырехступенчатой функцией. Для ее реализации в стекле использовались два хромовых шаблона, синтезированных на лазерном фотопостроителе. Результаты испытаний последнего образца микрообъектива будут представлены нами в последующих работах.

Таким образом, экспериментальная проверка качества микрообъектива (вариант 4, табл. 1) показала хорошее совпадение с данными расчета, а также подтвердила пригодность растровой технологии для изготовления дифракционного корректора. В целом трудоемкость изготовления этого варианта микрообъектива ниже, чем его рефракционного аналога, в связи с чем он может быть рекомендован для использования в системах дисковой оптической памяти.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. International Standart. ISO IEC 10089: 19XX. Optical Digital Data Disk. Second Version of ISO/IEC DP 10089: 130 mm Rewritable Optical Disk Cartridges.
2. Kenya G., Kazushige M., Genichi H., Shunsuke T. Spherical grating objective lenses for optical disk pick-ups: Proc. Int. Symp. on Optical Memory // Jap. J. Appl. Phys.—1987.—26.—Suppl. 26-4.—P. 135.
3. Ленкова Г. А., Чуринов Е. Г. Высокоапертурный микрообъектив с киноформным корректором // Автометрия.—1991.—№ 6.
4. Бобров С. Т., Туркевич Ю. Г. Объектив с дифракционным корректором для лазерного проигрывателя // Компьютерная оптика: Сб.—М.: МЦНТИ, 1990.—Вып. 7.
5. Полещук А. Г. Изготовление рельефно-фазовых структур с непрерывным и многоуровневым профилем для дифракционной оптики // Автометрия.—1992.—№ 1.
6. Moreau M. Semiconductor Lithography. Principles, Practices and Materials.—N. Y.; L.: Plenum Press, 1988.
7. Коронкевич В. П., Ленкова Г. А., Михальцова И. А. и др. Киноформные оптические элементы: методы расчета, технология изготовления, практическое применение // Автометрия.—1985.—№ 1.

Поступила в редакцию 15 июня 1993 г.