

ЭЛЕМЕНТЫ ОПТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

УДК 535.4

В. В. ДОНЦОВА, В. П. КОРОНКЕВИЧ, Г. А. ЛЕНКОВА,
И. А. МИХАЛЬЦОВА

(Новосибирск)

КИНОФОРМНЫЕ ЛИНЗЫ, Ч. II ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЛИНЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Основные элементы изображающей оптики — линзы и призмы — могут быть получены фотолитографическим путем, если их выполнить в киноформном виде [1]. Цель предлагаемой работы — рассмотреть особенности технологии получения киноформных линз в тонких пленках халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП) и фоторезистов. Работа является продолжением [2], где предложен оптический метод получения основного «инструмента» фотолитографического процесса — фотошаблона.

В отличие от исходной работы Джордана [1] мы применили для изготовления линз двухступенчатый процесс фотолитографии. На первом этапе оптическим методом получается фотоэмульсионный полутонкой шаблон линзы, на втором — рисунок шаблона переносится контактным или проекционным путем на подложку с фоторезистом или ХСП. Полученная фазовая структура — киноформ — может служить линзой или, после соответствующей обработки, матрицей, пригодной для дальнейшего тиражирования.

Фотошаблон. Шаблон линзы изготавливался на пластинках типа ВРЛ с эмульсией высокого разрешения. Топологическую структуру создавала картина колец специального интерферометра Фабри—Перо [3]. Пропускание T негатива по интенсивности определяло форму фазового профиля линзы в ХСП и фоторезисте. Экспериментальная зависимость T от экспозиции H для ВРЛ представлена на рис 1*. Фотошаблоны, как правило, имели низкую плотность почернения, так как основная линейная часть динамического диапазона характеристики лежала в области недодержек.

В соответствии с экспериментальным распределением интенсивности в интерференционных кольцах (2 на рис. 1) практически при любых выдержках рабочей была не только линейная область характеристической кривой I , но и ее верхняя или нижняя нелинейная часть. На рис. 1 графически представлен процесс преобразования распределения интенсивности 2 в пропускание фотошаблона 3. На примере трех выдержек t_1, t_2, t_3 показано, как может изменяться форма функции пропускания

* Следует отметить, что качество пластинок ВРЛ было неудовлетворительным. Эмульсия часто отслаивалась, характеристические кривые $T-H$ при одних и тех же условиях обработки имели различие по пропусканию на 5—10%. (На рис. 1 представлена усредненная зависимость T от H .)

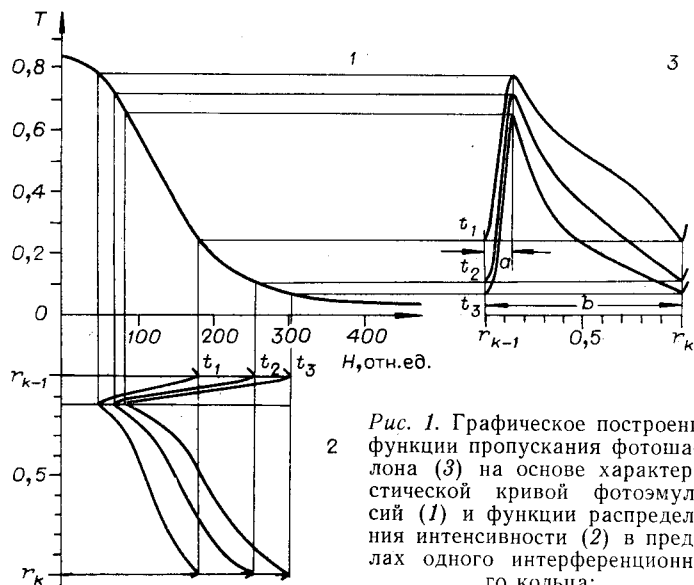


Рис. 1. Графическое построение функции пропускания фотошаблона (3) на основе характеристической кривой фотоэмульсий (1) и функции распределения интенсивности (2) в пределах одного интерференционного кольца:

r_{k-1} и r_k — радиусы $(k-1)$ -го и k -го колец.

шаблона в зависимости от диапазона рабочих экспозиций. Аналогичные изменения формы профиля можно наблюдать при увеличении крутизны характеристической кривой $T-H$. Время экспонирования выбиралось с учетом нелинейности характеристик ХСП и фоторезиста так, чтобы фотошаблон позволял реализовать пилообразный фазовый профиль киноформной линзы, близкий по форме к теоретическому.

Распределение 2 на рис. 1 не сохраняется постоянным в пределах поля интерференции. Как указывалось в работе [2], это объясняется кривизной поля изображения колец и ограниченной разрешающей способностью проектирующего объектива. Эффект особенно усиливается с помощью микрообъектива ($1\times$ или $3\times$) и длиннофокусного краю или возникает тепловая расстройка интерферометра во время экспонирования. Это приводит к сокращению рабочего поля шаблона и уменьшению линейной апертуры киноформной линзы.

На рис. 2 представлены результаты измерения пропускания шаблонов и границы их рабочего поля (сплошные линии). Штриховыми линиями показан размер поля, соответствующий расчетному диаметру линз, полученному из условия (8) в [2]. Из рисунка видно, что контраст колец на фотошаблоне 36 быстро

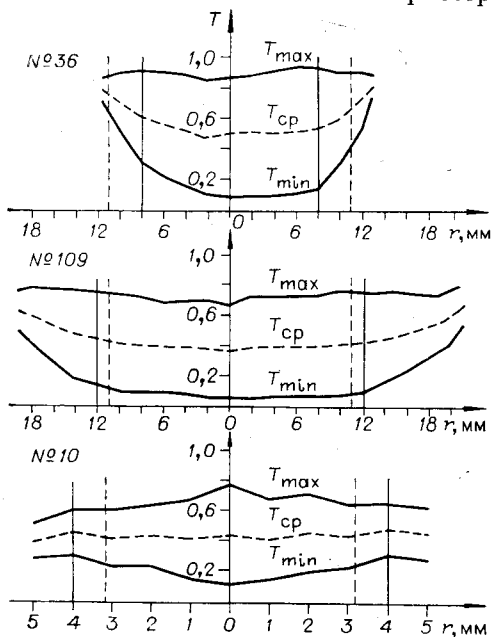


Рис. 2. Изменение максимального, минимального и среднего пропускания по полю фотошаблона.

Условия получения фотошаблонов: толщина интерферометра 26,9 мм; проектирующий объектив и микрообъектив соответственно для негативов № 36 — «И-37» ($f=300$ мм), $8\times$; № 109 — «И-37», $40\times$; № 10 — «Гелиос-40» ($f=85$ мм), $90\times$.

падает к краям, а среднее пропускание возрастает. Это не позволяло делать с таких негативов линзы расчетного диаметра и вынуждало ограничивать рабочее поле шаблона диаметром 16 мм, на котором падение контраста составляет 20%, а среднее пропускание возрастает на 10÷15%. Пропускание и контраст фотошаблона 109 сохраняются постоянными в широких пределах, поэтому линейная апертура линз, изготовленных с подобных негативов, близка к расчетной. Среднее пропускание негатива 10 остается постоянным по всему полю*, но наблюдается падение контраста колец на краю. Рабочее поле такого негатива было увеличено по сравнению с расчетным для увеличения относительного отверстия линз в ущерб дифракционной эффективности. Несимметричность профиля зон оценивалась по отношению отрезков a/b (см. рис. 1). На негативах 36 и 109 эта величина незначительно меняется от центра к краям и равна в среднем 22÷24%, на негативе 10 она возрастает от 23 до 37% в пределах рабочего поля. Приведенные значения в 1,5—2 раза превышают значения a/b в самой интерференционной картине. На возможные причины изменения формы было указано выше.

Изготовление линз. Для получения линз применялись фоторезисты ФСН-3 [4], имеющие широкую спектральную область поглощения с максимумом при $\lambda=0,51$ мкм. Фоторезисты этого типа способны создавать негативное и позитивное изображение рисунка фотошаблона в зависимости от типа проявления. В соответствии с характером пропускания фотошаблонов для создания положительных линз применялось негативное проявление. Максимальная высота рельефа h_{\max} соответствует фазовой задержке 2π , если выполняется условие

$$h_{\max}=\lambda/(n-1), \quad (1)$$

где λ — длина волны света, на которую рассчитывается линза; n — показатель преломления материала. У экспонированного и проявленного фоторезиста ФСН-3 $n=1,54$, тогда для $\lambda=0,63$ мкм $h_{\max}=1,17$ мкм. Чтобы сформировать качественный профиль с такой высотой, требуются слои с исходной толщиной не менее 1,5 мкм. Для изготовления линз использовались слои фоторезиста толщиной 1,5÷2 мкм, которые наносились на стеклянные подложки на центрифуге, разброс по толщине составлял 10÷15%.

При контактном экспонировании источником света служила мощная лампа накаливания. Подложки с пленкой фоторезиста и фотошаблон устанавливались в плоскости, где величина освещенности достигала 50—60 тыс. лк с отклонениями от среднего значения по полю не более 10%. Выбор формы функции пропускания фотошаблона и времени экспонирования проводился в соответствии с характеристическими кривыми фоторезистов $d=f(E)$, представляющими собой зависимость толщины d пленки после экспонирования и проявления от освещенности E при различных временах облучения. На рис. 3 представлено семейство этих кривых 1 для слоев с исходной толщиной 1,5 мкм и показано преобразование пропускания фотошаблона 2 в фазовый профиль линзы 3. При построении кривой 2 учитывалось снижение контраста картины в плоскости фоторезиста по сравнению с контрастом фотошаблона, причиной которого является рассеяние света эмульсией негатива (8÷12%) и неплотное прилегание шаблона к подложке. Из рисунка видно, что для каждого времени экспонирования существует свое пороговое значение интенсивности освещения $E_{\text{пор}}$, ниже которого облученные участки пленки полностью растворяются в проявителе. Для образования прочно связанной с подложкой пленки фоторезиста время экспонирования должно выбираться так, чтобы минимальные величины освещенности

* На рис. 2 масштаб расстояния r от центра картины колец для негатива 10 изменен пропорционально уменьшению фокусного расстояния проецирующего объектива, тем самым сохранен масштаб углового распределения в фокальной плоскости.

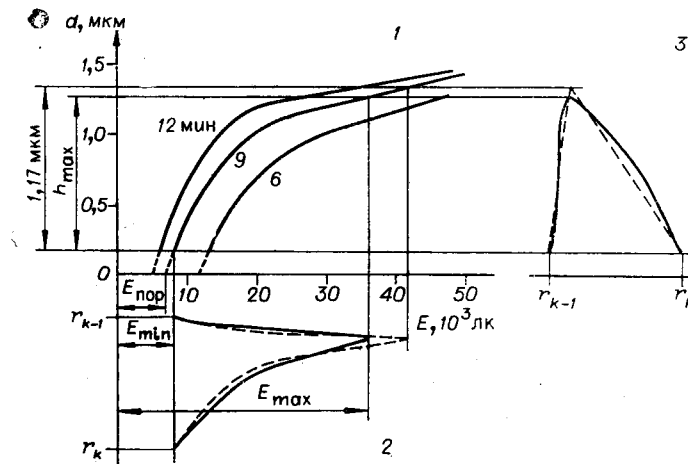


Рис. 3. Графическое построение формы фазового профиля линзы (3) на основе характеристической кривой фоторезиста (1) и функции пропускания фотошаблона (2).

превышали пороговое значение, по крайней мере, на 10%. Кроме того, время экспонирования должно обеспечивать получение высоты рельефа h_{\max} , равной 1,17 мкм, и оптимальной формы профиля.

Наиболее удовлетворительные линзы на фоторезисте были сделаны с негатива 109 (см. рис. 2) при времени экспонирования 9 мин. Полученный фазовый профиль зон отличается от теоретического. Размер области, где происходит скачок фазы от 0 до 2π , составляет $\sim 16\%$ от ширины зоны. Последнее обусловлено, прежде всего, формой функции пропускания фотошаблона. Форма пологого склона отклоняется от линейной на 15—20% и снизить эту величину, варьируя интенсивность освещения E_0 или время экспонирования, не удается. При увеличении E_0 функция пропускания передается линейно, увеличение времени экспонирования приводит к появлению на профиле зон плоского участка.

На рис. 3 штриховыми линиями показан линейный фазовый профиль зоны и соответствующая ему функция пропускания фотошаблона. Такая форма функций пропускания характерна для плотных негативов (3 на рис. 1 при t_3). Однако при экспонировании фоторезистов через плотные негативы требуются высокие значения интенсивности E_0 падающего света для того, чтобы выполнялось условие $E_{\min} > 1,1 E_{\text{пор}}$, о котором сообщалось выше. Возможно, более эффективным будет увеличение интенсивности освещения за счет дополнительной подсветки со стороны подложки, при этом должно существенно улучшиться качество пленок после проявления, на что указывалось в [5].

В пленках халькогенидных стеклообразных полупроводников под действием светового излучения изменяется показатель преломления на величину $\Delta n \sim 0,1$, достаточную для осуществления фазового сдвига 2π и более. Преобразование пропускания фотошаблона в фазовую структуру пленок ХСП осуществлялось контактным или проекционным путем при освещении ртутной лампой высокого давления или арговым лазером ($\lambda = 0,51$ мкм). В последнем случае лазерный пучок расширяется с помощью микрообъектива ($1\times$ или $3\times$) и длиннофокусного объектива ($f = 250$ мм). Для нарушения пространственной когерентности вблизи заднего фокуса микрообъектива устанавливается вращающийся матовый рассеиватель. Фотошаблон освещался через диафрагму, вырезающую наиболее равномерную часть пучка, в которой изменение интенсивности относительно центра не превышало 5%. Для проекционного экспонирования использовались объективы с высоким разрешением (400 лин/мм в режиме уменьшения 1:4). При контактной печати фокусное

расстояние и диаметр линз, а следовательно, относительное отверстие определялись рисунком фотошаблона и размером его рабочего поля. При проекционном экспонировании диаметр линзы уменьшался, а относительное отверстие увеличивалось пропорционально степени уменьшения.

Для определения времени экспонирования, а также для согласования отклика ХСП с распределением пропускания фотошаблона была снята характеристическая кривая ХСП состава As_2S_3 для пленок толщиной 14 мкм (рис. 4). Характерно, что даже при сдвиге 3λ не наблюдается перехода в область насыщения, что присуще пленкам меньшей толщины [6]. Положение рабочей точки на характеристической кривой определялось средней плотностью световой энергии, падающей на пленку через фотошаблон, которая составляла $0,5\text{--}0,8$ Дж/мм². В области этих энергий характеристическая кривая имеет выпуклую форму, поэтому для получения линейного фазового профиля функция пропускания фотошаблона должна иметь впадину на пологой части.

Аналогично схеме переноса фотошаблона на фоторезист (см. рис. 3) можно предсказать форму фазового профиля на ХСП. Время экспонирования зависит от плотности и контраста негатива и мощности источника в полосе поглощения материала. При работе с ртутной лампой оно составляло 8 ч, а с аргоновым лазером — 20—50 мин. Большое время экспонирования объясняется низкой чувствительностью пленок ХСП.

Анализ характеристик киноформных линз. Качество линз оценивалось по высоте и форме фазового профиля, дифракционной эффективности и разрешению. Фазовый профиль контролировался на интерферометре Маха—Цендера, в одно из плеч которого помещалась испытываемая линза. Интерферограммы фазового профиля приводятся на рис. 5, а, б. Сдвиг на одну полосу соответствует фазовому скачку, равному 2π . Разрешение киноформных линз контролировалось по стандартным штриховым мирам. Полученные значения совпадали в пределах погрешности измерения с дифракционным пределом разрешения, определяемым апертурой.

Дифракционная эффективность находилась как отношение энергии, собирающейся в главном фокусе (+1-й порядок), ко всей энергии, прошедшей через линзу. Так как фазовый профиль не совпадал с идеальным, часть энергии направлялась в фокусы высших порядков ($f/2$, $f/3$, ...) или проходила без отклонения. Для проведения детального анализа контролировали распределение энергии по всем дифракционным порядкам, а также долю рассеянного света.

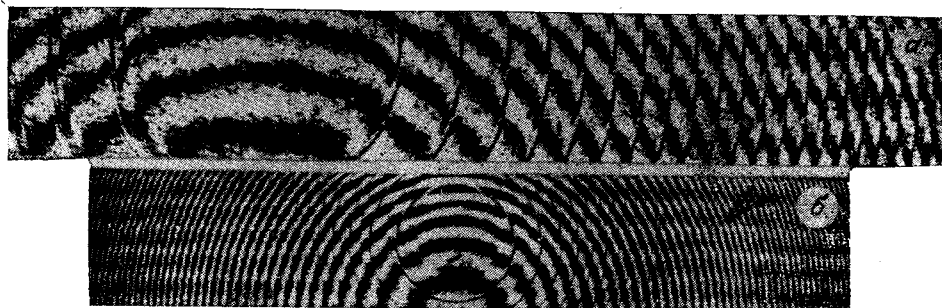


Рис. 5. Интерферограммы фазового профиля киноформной линзы на основе ХСП (а) и фоторезиста (б).

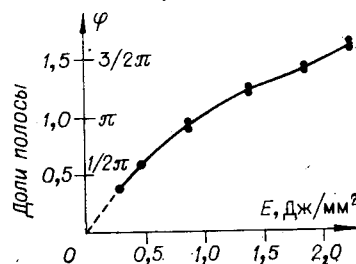


Рис. 4. Характеристическая кривая ХСП.

Характеристики некоторых линз с указанием основных условий эксперимента приведены в таблице. Здесь Σ_- — доля энергии в отрицательных фокусах, Σ_+ — в положительных, кроме главного. Лучшие из линз, полученных на ХСП и фоторезисте, имеют дифракционную эффективность, равную 40—50%. В зависимости от качества фотошаблона высота фазового скачка для этих линз сохраняется постоянной или уменьшается от центра к краям от 1 до 0,7 полосы. При идеальной форме профиля теоретическое значение дифракционной эффективности для таких фазовых скачков должно лежать в пределах 70—100% (см. рис. 1, *в* из [7]). Значительный размер области скачка фазы (15—20% ширины зоны), а также большое рассеяние света не позволяют довести дифракционную эффективность до теоретического значения.

Особенно большое рассеяние наблюдается при контактном экспонировании (см. таблицу). Так, для линз на фоторезисте рассеяние составляет 20—24% независимо от экспозиции, в то время как рассеяние засвеченного и проявленного фоторезиста с подложкой не превышает 4—6%. В линзах на ХСП рассеяние не остается постоянным. Собственное рассеяние незасвеченных пленок равно 10—15%, при облучении светом оно увеличивается с ростом поглощенной энергии до 20—35%. Рассеяние линз на ХСП, полученных контактным путем, возрастает до 60% и более. В некоторых случаях это объясняется условиями эксперимента, например нагревом пленки при экспонировании из-за отсутствия теплового фильтра (линза 15), в других не было очевидной причины (линза 7). Вероятно, возрастание рассеяния при контактном экспонировании как на ХСП, так и на фоторезистах вызывается воспроизведением мелких неоднородностей и дефектов эмульсии фотошаблона. Это подтверждается тем, что рассеяние линз на ХСП, полученных проекционным методом, не превышает собственное рассеяние материала (линзы 50—53, 61).

Для линз на ХСП, изготовленных проекционным экспонированием, и для всех линз на фоторезисте прослеживается зависимость дифракционной эффективности от высоты и формы фазового профиля (см. таблицу). Например, при увеличении фазового скачка от π до 2π дифракционная эффективность линз 50—52 возрастает с 17 до 50%.

Большая доля рассеянного света и значительные колебания этой величины не позволяют установить общую для всех линз зависимость дифракционных свойств от фазового профиля зон. Поэтому мы анализировали свойства линз, исключив из рассмотрения рассеянный свет и определяя долю энергии в каждом порядке по отношению к дифрагированному свету. При таком подходе можно оценить предельную дифракционную эффективность, которая достижима при данном фазовом профиле на материале с низким рассеянием. На рис. 6 представлены характерные виды фазовых профилей для центральной и средней частей линз и соответствующие им диаграммы распределения энергии по дифракционным порядкам. Из рисунка видно, что при величине фазового скачка $\sim \pi$ (линза 13) доли энергии в $+1$ -м и нулевом порядках приблизительно равны и составляют 40% дифрагированного света, что соответствует [7]. Возрастание фазового скачка от π до 2π при сохранении формы профиля, близкой к пилообразной (линзы 13, 5, 15), приводит к увеличению энергии в $+1$ -м порядке до 74%.

Для фазовой структуры в пленках фоторезиста характерно появление плоского участка на вершине профиля при переэкспонировании (линза 17). В этом случае доля энергии в нулевом порядке достигает 62%. При улучшении формы профиля зон (линзы 15 и 14) происходит перекачка энергии из 0-го в $+1$ -й порядок. Линза 14 с профилем без плоского участка собирает в главном фокусе 65% энергии и пропускает без отклонения 14%. Сравнение диаграмм линз 13 (ХСП) и 17 (фоторезист) показывает, что при равной величине скачка фазы линза 13 имеет

f, мм	Диаметр, мм	Номер фотошоблона	Условия получения линзы	Номер линзы	Фазовый скачок	Распределение энергии					
						по дифракционным порядкам			по отношению к дифрагированному свету		
						+1	0	Σ_{-}	Σ_{+}	Рассеяние	+1

Халькогениды

112	8	8	Проектирование 1:4	50	π 1,8л-1,4л 2л-1,6л	17	52	8	2	21	22	66
				51		38	21	8	10	23	49	27
				52		50	12	6	5	27	68	16
60	8	11	Аргонный лазер (Ar)	53	2л-1,4л	41	10	14	6	29	58	14
1800	16	36	Контактная печать Ртутная лампа	13	1,4л-π 1,6л 2л-1,6л	32	30	7	11	20	40	38
				5		41	17	10	3	29	58	24
				15		31	4	5	2	58	74	10
136	8	4	Контактная печать	9	2л-1,4л	28	28	8	4	32	41	41
				7		7	2	0	85	47	40	
				3		17	13	3	0	67	52	39
136	8	10	Ar-лазер	62	2л-1,4л 2л-1,6л	25	7	6	1	61	64	18
				61		22	13	4	27	30	45	
				10		10	10	10	10	10	10	10

Фоторезисты

1800	16	40	Контактная печать	17	1,2л-1,5л 1,6л 1,8л	14	47	7	6	24	18	62
				16		44	14	10	9	23	57	18
				14		51	11	9	7	22	65	14
1650	24	109	Лампа накаливания	20	1,8л	51	9	9	9	22	65	12
				19		49	9	7	11	24	64	12
				109		109	109	109	109	109	109	109

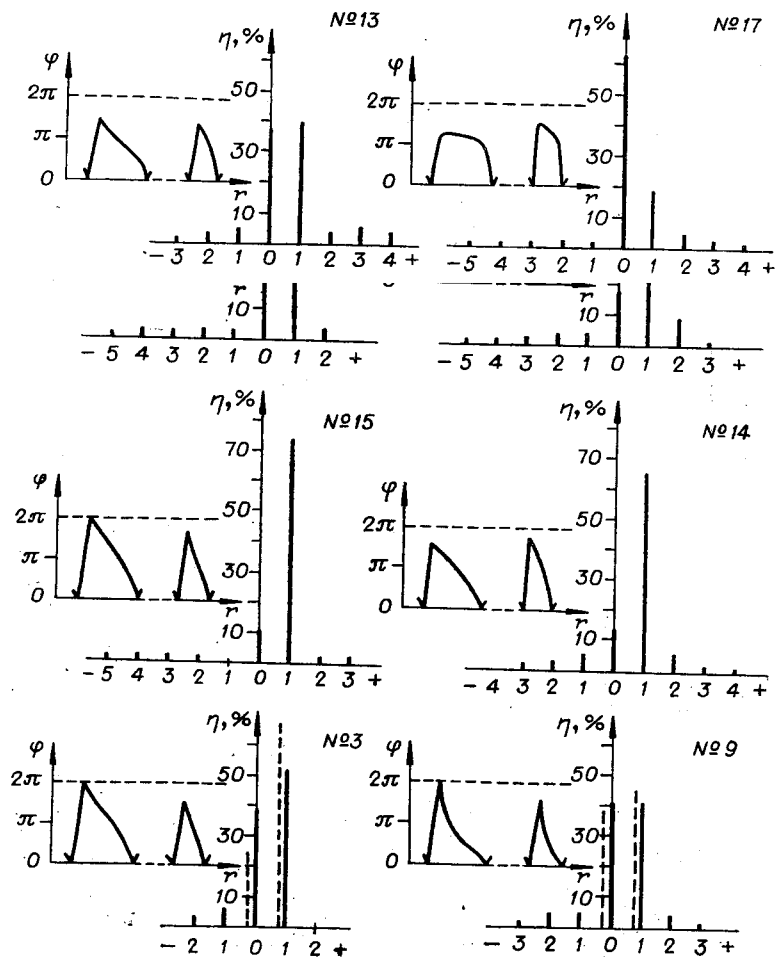


Рис. 6. Формы фазового профиля и диаграммы распределения энергии по дифракционным порядкам без учета рассеянного света.

больше энергии в $+1$ -м порядке благодаря более оптимальной форме профиля. В линзах 3 и 7 значительная доля энергии проходит без отклонения, что можно объяснить действием крайних зон: величина скачка фазы уменьшается от центра к краям, а форма профиля приближается к симметричной. Влияние крайних зон подтверждается возрастанием доли энергии в $+1$ -м порядке с 52 до 67% при уменьшении диафрагмы перед линзой 3 с 8 до 5 мм (на рис. 6 доли энергии для 0-го и $+1$ -го порядков на диаметре 5 мм показаны штриховыми линиями), одновременно уменьшается доля энергии в 0-м порядке.

Профиль линзы 9 характерен для контактной печати на ХСП с плотных негативов. Доля энергии в нулевом порядке у этой линзы приблизительно такая же, как и у линзы 3. Однако при уменьшении диаметра линзы 9 с 8 до 5 мм диаграмма распределения энергии не изменяется. Это свидетельствует о том, что большой нулевой порядок обусловлен

не только снижением высоты профиля в крайних зонах, но и формой профиля центральных зон.

Анализ характеристик линз без учета рассеянного света показывает, что лучшие образцы киноформных линз собирают в главном фокусе 64—75% энергии. Высота фазового профиля в них в среднем по полю ниже требуемого значения. Можно ожидать, что при выполнении по

1. Jordan J. A., Jr., Hirsch P. M., Lesem L. B., Van Rooy D. L. Kinoform lenses.—“Appl. Opt.”, 1970, vol. 9, N 8, p. 1883—1887.
2. Коронкевич В. П., Ленкова Г. А., Михальцова И. А. Киноформные линзы. Ч. I. Оптический метод получения фотошаблона.—«Автометрия», 1977, № 5, с. 71—79.
3. Годдина Н. Д., Захаров М. И., Троицкий Ю. В. Синтез характеристик многолучевого отражающего интерферометра.—«Автометрия», 1975, № 3, с. 107—118.
4. Белый В. И., Гудаев О. А., Фокина И. А. Исследование кинетики фотопревращений в слоях фоторезистов под действием лазерного облучения.—«Автометрия», 1976, № 4, с. 84—88.
5. Clair J.-J., Frcjlich J., Jonathan J. M. J., Forris L. H. Negative photoresists and integrated optics.—“Nouv. Rev. Optique”, 1975, t. 6, N 5, p. 303—306.
6. Koronkevitch V. P., Lenkova G. A., Mihaltsova I. A., Remesnik V. G., Fateev V. A., Tsukerman V. G. Kinoform optical elements.—In: The Proc. of the American Soviet Seminar on Optical Information Processing. N. Y., Plenum Press Corp., 1975.
7. Вережкин В. А., Донцова В. В., Ленкова Г. А. Оптический метод изготовления одномерных киноформ.—«Автометрия», 1978, № 3, с. 71—80.

Поступила в редакцию 24 апреля 1978 г.

УДК 681.327.68 : 778.38 : 532.783

А. В. ГУК, П. И. КОЛЕННИКОВ, В. А. ПИЛИПОВИЧ

(Минск)

УСТРОЙСТВО ВВОДА ИНФОРМАЦИИ В ГОЛОГРАФИЧЕСКОЕ ЗУ НА ОСНОВЕ МОЗАИЧНОГО ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО УПРАВЛЯЕМОГО ТРАНСПАРАНТА

Жидкокристаллические (ЖК) управляемые транспаранты (УТ) мозаичного типа обладают существенными преимуществами по сравнению с матричными жидкокристаллическими управляемыми транспарантами при использовании их для ввода информации в голографическое ЗУ. К этим преимуществам относятся высокое быстродействие и контраст оптического изображения [1]. Однако создание таких устройств ввода информации в котором осуществляется по мере поступления из ЭВМ. формационных каналов ($10^3 \div 10^5$). Ряд авторов [2,3] предлагают использовать для управления мозаичным ЖК УТ матричное ЗУ, запись информации в котором осуществляется по мере поступления из ЭВМ. После формирования страницы информационный массив подается через матрицу ключевых элементов на независимые электроды мозаичного ЖК УТ. Как показано в [4], матричное ЗУ может быть выполнено с использованием интегральных схем на единой кремниевой подложке. Структура устройства ввода может быть существенно упрощена, если для