

7. Bouwhuis G. and Burgstede P. The optical scanning system of the Philips "VLP" record player.—"Philips Tech. Rev.", 1973, vol. 33, N 7, p. 186—189. (Also in "J. of the SMPTE", 1974, vol. 83, N 7, p. 572—575).
8. Janssen P. J. M. and Day P. E. Control mechanism in the Philips "VLP" record player.—"Philips Techn. Rev.", 1973, vol. 33, N 7, p. 190—193. (Also in "J. of the SMPTE", 1974, vol. 83, N 7, p. 576—579.)
9. Broussaud G., Spitz E., Tinet C. M. and Carvenec F. L. A video disc optical design.—Int. Symposium Digest of Technical Papers. Lewis Winner, N. Y., 1974, p. 38, 39.
10. Bricot C., Lehureau J. C., Puech C. Optical readout of video disc.—"IEEE Trans. on Consumer Electronics", 1976, p. 304—308.
11. Ahmed M., Brown R. and Korpel A. The aerodynamic stabilization of video discs.—"IEEE Trans. on Consumer Electronics", 1975, vol. CE-21, N 2.
12. Korpel A. Optical video disc technology.—Proc. of the S. P. I. E. Vol. 53. Laser Recording. San Diego, California, 1974.
13. Whitman R. L. A transmission mode optical video disc system.—Int. Symposium Digest of Technical Papers. Lewis Winner, N. Y., 1974, p. 34—35.
14. Korpel A. A review of video disc principles.—Int. Symposium Digest of Technical Papers. Lewis Winner, N. Y., 1974, p. 32—33.
15. Laub L. J. Optics of reflective video disc players.—"IEEE Trans. on Consumer Electronics", 1976, p. 258—265.
16. Adler R. An optical video disc player for N. T. S. C. Receivers.—"Trans. BTR", 1974, p. 230—234.
17. Adler R. Video disc system alternatives.—"IEEE Trans. on Consumer Electronics", 1976, p. 302—303.
18. Hrbek G. W. An experimental optical videodisc playback system.—"J. of the SMPTE", 1974, vol. 83, N 7, p. 580—582.
19. Fink O. G. Electronic engineers' handbook. Sect. 20. McGraw-Hill, N. Y., 1975.
20. Palermo P., Korpel A., Dickinson G. and Watson W. Video disc mastering and replication (to be published in "Optics and Laser Technology" (G. B.)).
21. Winslow J. S. Mastering and replication of reflective videodiscs.—"IEEE Trans. on Consumer Electronics", 1976, p. 318—326.
22. Hannan W. J. et al. Holo tape: a low-cost prerecorded television system using holographic storage.—"J. of the SMPTE", 1973, vol. 82, N 11, p. 905—915.
23. Tsunoda Y. et al. Holographic video disk: an alternative approach to optical video disks.—"Appl. Opt.", 1976, vol. 15, N 6, p. 1398—1403.
24. Tsunoda Y. and Takeda Y. High density image-storage holograms by a random phase sampling method.—"Appl. Opt.", 1974, vol. 13, N 9, p. 2046—2051.
25. Kenney G. C. Special purpose applications of the optical videodisc system.—"IEEE Trans. on Consumer Electronics", 1976, p. 327—338.
26. Mathieu M. A random access system adapted for the optical video disc: its impact on information retrieval.—"J. of the SMPTE", 1977, vol. 86, N 2, p. 80—83.

*Поступила в редакцию 8 апреля 1977 г.*

УДК 535.4 : 778.38

**В. П. КОРОНКЕВИЧ, Г. А. ЛЕНКОВА, И. А. МИХАЛЬЦОВА**  
(Новосибирск)

### КИНОФОРМНЫЕ ЛИНЗЫ, Ч. 1 ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ФОТОШАБЛОНА

В связи с появлением управляемых от ЭВМ многоградационных графопостроителей и новых перспективных светочувствительных материалов вновь возник интерес к дифракционным оптическим системам, которые можно тиражировать, снимая копии с предварительно нарезанных матриц. Изготовление таких матриц представляло большие трудности, так как требовалось механическим путем получить поверхностный рельеф с переменным профилем, минимальное расстояние между элементами которого порядка длины волны.

В отличие от обычных оптических систем в дифракционных системах длина оптического пути вдоль всех лучей, соединяющих объект

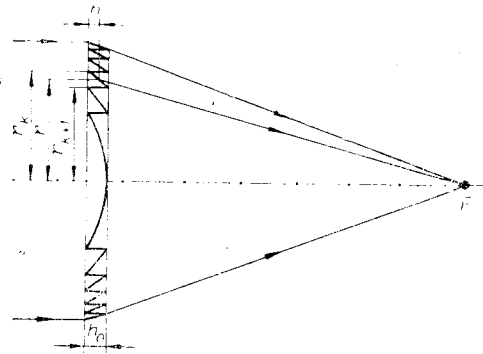


Рис. 1. Профиль фазовой зонной пластинки.

либо прозрачного материала в пределах каждой зоны по закону

$$h = h_0 - a(r^2 - r_{k-1}^2), \quad (1)$$

где  $a$  — постоянная, зависящая от взаимного положения предмета и изображения (при работе с параллельным пучком лучей  $a = 1/f(n-1)$ );  $r$  — высота прохождения луча относительно оптической оси в пределах  $k$ -й зоны;  $r_{k-1}$  — радиус  $k-1$ -й зоны;  $h_0$  — максимальная толщина, равная  $\lambda/(n-1)$ ;  $f$  — фокусное расстояние фазовой пластинки;  $n$  — показатель преломления материала;  $\lambda$  — длина волны света.

Обычно  $f \gg k\lambda$  и радиусы зон обратно пропорциональны корням квадратным из последовательности целых чисел

$$r_k = (2k\lambda f)^{1/2}. \quad (2)$$

На основании (2) расстояние между зонами можно представить как

$$r_k - r_{k-1} = f\lambda/r_{cp}, \quad (3)$$

где

$$r_{cp} = (r_k + r_{k-1})/2.$$

В современном представлении зонную фазовую пластинку (она известна так же, как фазовая линза Френеля) можно назвать киноформной линзой. Киноформ — новая форма кодирования волнового фронта, которая основана на регистрации только фазы волны, причем по модулю  $2\pi$ . По сравнению с голограммой киноформ произвольного объекта дает при восстановлении изображение только в одном дифракционном порядке. Впервые киноформная структура была синтезирована в 1969 г. [2]. Сначала изготавливался фотонегатив специального прозрачного материала, вычерченного с помощью управляемого ЭВМ графопостроителя, а затем путем отбеливания изменение амплитудного пропускания негатива переводилось в изменение толщины слоя эмульсии.

Киноформные линзы можно синтезировать также оптически, сканируя многолучевую интерференционную картину эталона Фабри — Перо. Этот способ основан на аналогии законов изменения радиусов колец Фабри — Перо и зон фазовой пластинки. Его предложил и осуществил Клер [3]. Изменяя ступенчато длину эталона в пределах длины волны и фотографируя каждый раз картину колец с подходящей экспозицией, он получил негатив с необходимым амплитудным пропусканием. В отличие от графического способа, который можно назвать поточечным, в оптическом вся картина колец, соответствующая линиям равных фаз, регистрируется одновременно.

Общим недостатком рассмотренных способов является дискретный характер кодирования фазы. В результате уменьшается отношение

и его изображение, не остается постоянной, а меняется при переходе от одной зоны к другой скачком, равным по фазе  $2\pi$ . Примером дифракционных систем служит зонная пластинка Френеля (решетка Сорэ) [1]. Ее основной недостаток заключается в разбрасывании световой энергии по изображениям разных порядков. Этого можно избежать, если зонную пластинку выполнить в виде фазовой (рис. 1), изменяя оптическую толщину  $h$  какого-

сигнал/шум в восстановленном изображении. Оптический способ позволяет моделировать плавно меняющийся фазовый профиль, если при фотографировании картину колец непрерывно сканировать с переменной скоростью. В этом случае требуется точное управление скоростью сканирования, что значительно усложняет процесс изготовления фотонегатива.

В настоящей работе исследуется оптический метод изготовления киноформных линз, свободный от квантования фазы и процесса сканирования, в котором негатив получается за одну экспозицию. Такой метод стал возможным благодаря использованию свойств специального интерферометра Фабри — Перо, работающего в отраженном свете [4].

Этот интерферометр позволяет сделать распределение интенсивности в кольцах асимметричным, подбирая параметры переднего зеркала интерферометра так [5], чтобы функция распределения имела форму, близкую по виду к фазовому профилю киноформной линзы. Согласно (1), теоретический профиль фазовой линзы, начиная со 2-й зоны, аппроксимируется в первом приближении прямоугольным треугольником. Именно к такому профилю стремились мы приблизиться, создавая киноформную линзу. При этом необходимо было учесть характер нелинейности отклика светочувствительных материалов, которые применялись для изготовления фотошаблона и фазовой линзы, и согласовать с ними параметры покрытия зеркал.

Рассмотрим возможности оптического метода. На рис. 2 показана принципиальная часть оптической схемы. Негатив киноформной линзы получается путем проектирования колец Фабри — Перо на фотопластинку. Фокус киноформной линзы можно было предварительно рассчитать, зная фокальное расстояние проектирующего объектива  $f_{об}$  и расстояние между зеркалами интерферометра  $t$ :

$$f_{л} = f_{об}^2 / 2t. \quad (4)$$

Формула (4) следует из равенства радиусов колец Фабри — Перо и радиусов зон фазовой линзы:

$$f_{об} (k\lambda/t)^{1/2} = (2k\lambda f_{л})^{1/2}. \quad (5)$$

Оптический метод накладывает некоторые ограничения на светосилу киноформной линзы. Для эффективной записи фазового профиля форма распределения интенсивности в каждом кольце интерференционной картины должна сохраняться в пределах диаметра линзы. Естественно предположить, что профили крайних и центральных зон подобны, если число интерферирующих лучей  $N$  не меньше эффективного [6], равного

$$N = \frac{2,98 \sqrt[4]{R_1 R_2}}{1 - \sqrt{R_1 R_2}}, \quad (6)$$

где  $R_1$ ,  $R_2$  — коэффициенты отражения зеркал интерферометра. Из рис. 2 видно, что для соблюдения приведенного выше мы должны при данном расстоянии между зеркалами эталона  $t$  и диаметре зеркал  $d_{эт}$

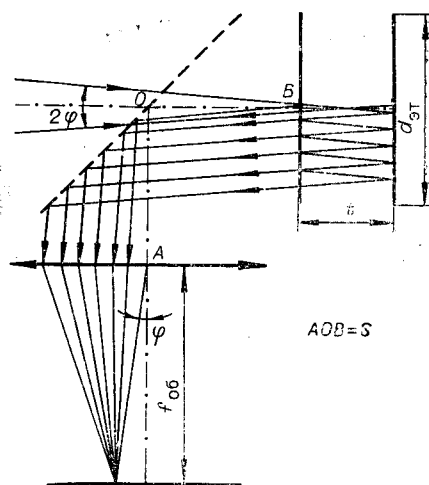


Рис. 2. Ограничение числа интерферирующих лучей диаметром зеркал эталона.

ограничиться углами выхода лучей из интерферометра  $\varphi$ , для которых выполняется условие

$$\varphi \leq d_{\text{от}}/4Nt. \quad (7)$$

Тогда с учетом формулы (4) допустимый диаметр киноформной линзы и относительное отверстие можно представить в виде

$$d_{\text{л}} = d_{\text{от}} f_{\text{об}} / 2Nt; \quad (8)$$

$$d_{\text{л}} / f_{\text{л}} = d_{\text{от}} / f_{\text{об}} N. \quad (9)$$

Диаметр проектирующего объектива  $d_{\text{об}}$  не должен виньетировать эффективно интерферирующие лучи (см. рис. 2), поэтому необходимо выполнять следующее условие:

$$d_{\text{об}} \geq d_{\text{от}} (1 + S/2Nt), \quad (10)$$

где  $S$  — расстояние между интерферометром и объективом. Формула (9) с учетом (10) преобразуется в

$$d_{\text{л}} / f_{\text{л}} \leq d_{\text{об}} / [f_{\text{об}} (N + S/2t)]. \quad (11)$$

Анализ формул (8), (9) и (11) показывает, что: 1) относительное отверстие киноформной линзы, полученной оптическим способом, всегда меньше относительного отверстия проектирующего объектива как минимум в  $N$  раз; 2) для изготовления киноформных линз желательно применять светосильные проектирующие объективы и высокоапертурные эталоны Фабри — Перо; 3) при работе в отраженном свете желательно сократить расстояние  $S$  между интерферометром и объективом.

Процесс изготовления киноформных линз состоял из двух ступеней. На первой мы получали негатив на голографических пластинках высокого разрешения (фотошаблон). На второй — пропускание шаблона по интенсивности преобразовывалось в соответствующее изменение оптической толщины тонких пленок за счет изменения геометрической толщины или показателя преломления. В первом случае материалом пленки служил фоторезист, во втором — халькогенидный стеклообразный полупроводник (ХСП). Непосредственное получение киноформной линзы в оптической схеме рис. 3 пока не представляется возможным из-за недостаточной чувствительности сред для фазовой записи и низкой светосилы схемы. Исключение первой промежуточной ступени упрощало бы операцию согласования характеристических кривых материалов с параметрами интерферометра. Однако удобство фотошаблона состоит в том, что он позволяет тиражировать киноформные линзы без использования интерферометра.

Оптическая схема для изготовления фотошаблона представлена на рис. 3. Излучение гелий-неонового лазера 1 ( $\lambda = 0,6328$  мкм) фокусировалось микрообъективом 2 на щель диаметром 0,01—0,03 мм, за которой устанавливался вращающийся диффузный рассеиватель 3. Освещенная поверхность последнего, имевшая размер 5—8 мм, проектировалась с помощью линзы 4 в центр интерферометра Фабри — Перо 6, 7. Перед экспозицией расстояние между зеркалами интерферометра регулировалось с помощью пьезокерамики так, чтобы в центре картины колец в отраженном свете наблюдалось минимальное значение

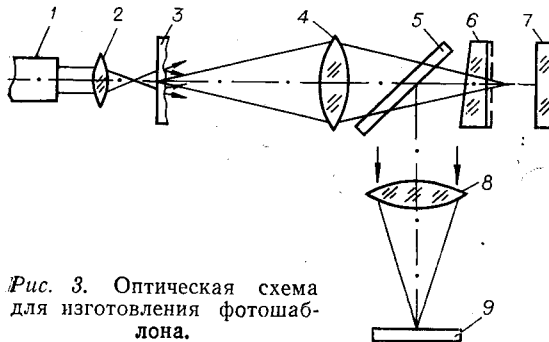


Рис. 3. Оптическая схема для изготовления фотошаблона.

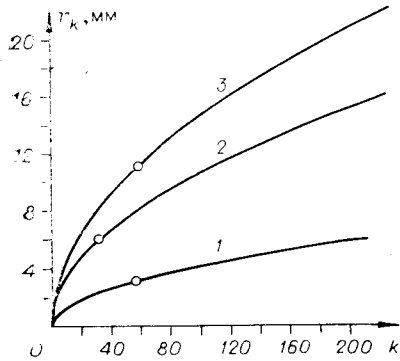


Рис. 4. Зависимость между радиусом зоны  $r_k$  и ее порядковым номером  $k$ :  
 $f_D$ : 1 — 134,3; 2 — 900; 3 — 1673 мм.

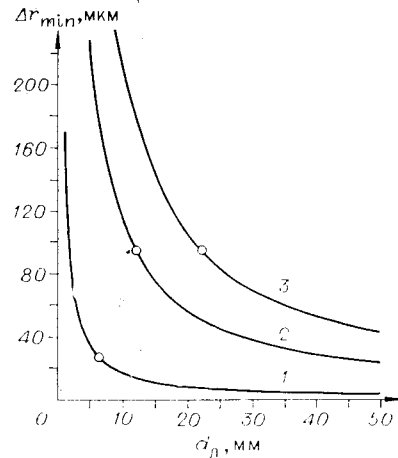


Рис. 5. Зависимость между шириной последних зон  $\Delta r_{\min}$  и диаметром киноформной линзы  $d_D$ :  
 $f_D$ : 1 — 134,3; 2 — 900; 3 — 1673 мм.

интенсивности. Перед интерферометром устанавливалась светоделительная пластина 5, направляющая свет в проектирующий объектив 8. В фокальной плоскости последнего располагалась кассета с фотопластинкой 9, на которой регистрировалась картина интерференционных колец равного наклона. Схема, работающая в сходящемся пучке, была выбрана для освещения интерферометра из соображений минимальных потерь света и уменьшения виньетирования наклонных пучков. Одновременно при таком освещении увеличивалась глубина фокусировки колец, так как уменьшалась апертура источника.

Оптическая схема имела следующие параметры:  $f_{об} = 300$  («Индустар-37», относительное отверстие 1/4,5) и 85 мм («Гелиос-40», 1/1,5);  $t = 26,9$  и 50 мм;  $R_1 = 0,5$ ;  $R_2 = 0,99$ ;  $N \approx 9$ ;  $S = 190$  мм,

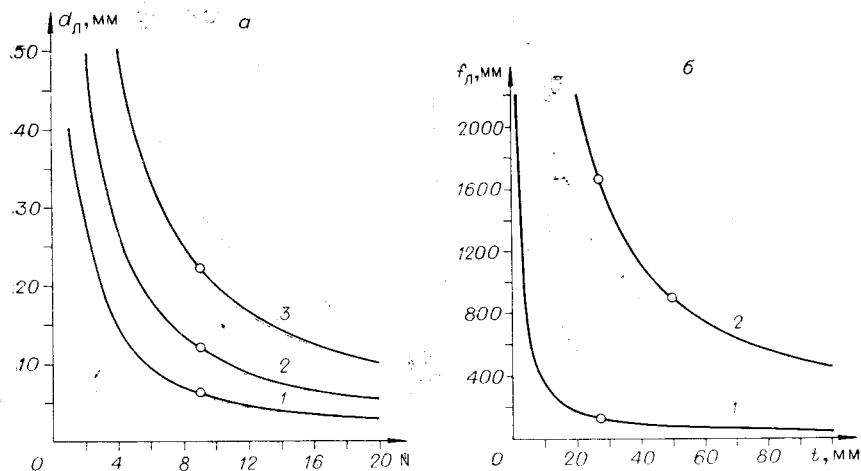


Рис. 6. Зависимость характеристик киноформных линз от параметров оптической схемы:

а — диаметр линзы  $d_D$  как функция числа эффективно интерферирующих лучей  $N$ :

$f_{об}$ : 1 — 85, 2 — 300, 3 — 300 мм;

$t$ : 1 — 26,9, 2 — 50, 3 — 26,9 мм;

б — изменение фокального расстояния линзы  $f_D$  от расстояния между зеркалами интерферометра Фабри — Перо  $t$ :  $f_{об}$ : 1 — 85, 2 — 300 мм.

№ п/п	$d_{л'}$ , мм	$f_{л'}$ , мм	$d_{л'}/f_{л'}$
1	12	900	1/75
2	6,3	134,3	1/21
3	22,3	1673	1/75

$d_{ст} = 36$  мм, фокальное расстояние линзы 4 (см. рис. 3) 150 мм. Для этих данных и  $\lambda = 0,6328$  мкм на рис. 4—6, а, б графически представлена связь характеристик киноформных линз и параметров оптической схемы. Схема позволяла получить фотошаблоны киноформных линз с расчетными характеристиками (на рис. 4—6 им соответствуют точки, отмеченные кружками), приведенными в таблице.

В действительности интерференционные кольца наблюдались на большом диаметре, но их профиль искажался из-за уменьшения числа интерферирующих лучей.

При изготовлении фотошаблонов особое внимание уделялось равномерности освещения фотопластины. Прежде всего, она зависела от распределения освещенности в передней фокальной плоскости осветительной линзы 4 (см. рис. 3), которая сопряжена с фокальной плоскостью проектирующего объектива, а следовательно, с поверхностью фотопластины. Было проверено несколько способов освещения.

Известно, что плотность излучения спадает от центра пучка к краям по закону Гаусса. Для получения равномерного освещения можно использовать только центральную часть пучка, теряя при этом в мощности излучения. На рис. 7, а (кривые 1—3) приведены графики распределения интенсивности в передней фокальной плоскости линзы 4 (см. рис. 3) для трех различных микрообъективов  $20\times$ ,  $40\times$  и  $90\times$ . Во всех случаях после диафрагмы, расположенной в фокусе микрообъектива, устанавливалось вращающееся матовое стекло. Вертикальными штриховыми линиями на графиках рис. 7, а отмечены границы площадки ( $\varnothing 25$  мм), сопряженной с фотопластинкой. Как видно из рисунка, падение интенсивности в этой области от центра достигало 10,5—25%. Для расчетных диаметров киноформных линз рассматривалось распределение интенсивности на площадке диаметром 11 и

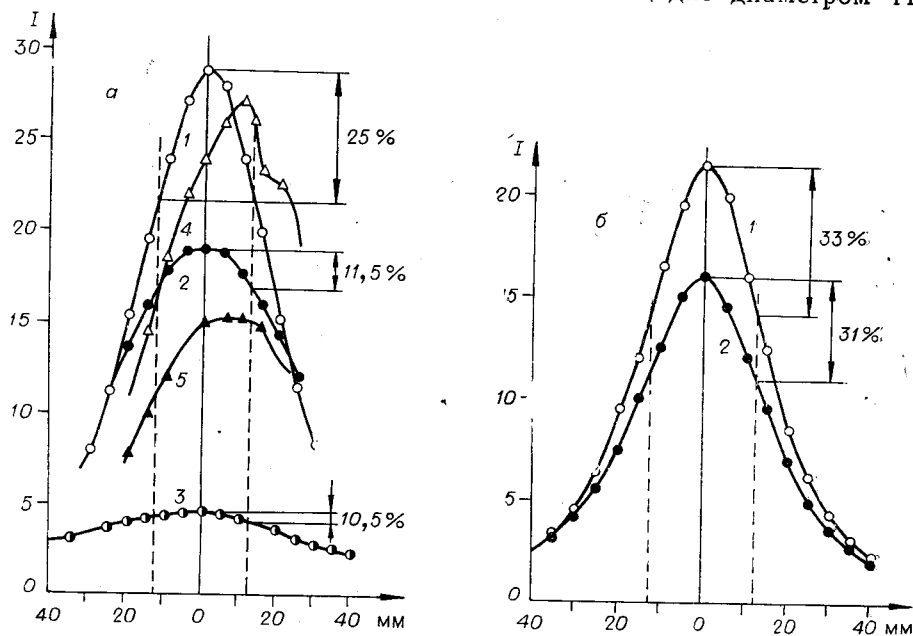


Рис. 7. Распределение интенсивности пучка в фокальной плоскости осветительной линзы:

а — для микрообъективов различной кратности (кривая 1 —  $20\times$ ; 2, 4, 5 —  $40\times$ ; 3 —  $90\times$ ); б — после двух диффузных рассеивателей при расстоянии между ними 2 мм (кривая 1) и 40 мм (2).

6 мм для длин эталона 26,9 и 50 мм соответственно. На этих площадках падение интенсивности не превышало 1,6 и 0,52%.

В условиях нашего эксперимента происходила тепловая расстройка лазера, которая приводила к значительной асимметрии в распределении интенсивности в пучке, освещающем интерферометр (см. рис. 7, а, кривая 4). Асимметрия полностью не устранялась подстройкой зеркал лазера и микрообъектива с диафрагмой. Введение диффузного рассеивателя после микрообъектива только сглаживало резкие перепады интенсивности (см. рис. 7, а, кривая 5). Асимметрия в пучке возникала иногда во время экспозиции и снижала качество фотошаблона.

Для исключения частых юстировок микрообъектива был опробован способ освещения, при котором вместо микрообъектива 2 на рис. 3 устанавливался еще один диффузный рассеиватель. Распределение интенсивности для этого способа показано на рис. 7, б. Оказалось, что независимо от расстояния между рассеивателями относительное падение интенсивности на площадке диаметром 25 мм было не меньше чем 32—34%. Для освещения выбиралась схема с микрообъективом, причем его увеличение составляло  $40\times$ . По сравнению с микрообъективом  $90\times$  в этом случае наблюдалось менее равномерное освещение. Однако этот недостаток незначителен по сравнению с выигрышем в интенсивности света (см. рис. 7, а).

Качество фотошаблона зависело от резкости изображения колец, которая определялась разрешающей способностью проектирующего объектива и кривизной поверхности изображения. Разрешающая способность фотообъектива с фокальными расстояниями 85 и 300 мм составляла соответственно 32 и 20 штр/мм. Из сравнения этих данных с графиком рис. 5 видно, что с первым объективом мы работали на пределе разрешения, в результате чего размывался крутой склон крайних зон. Разрешение второго объектива было достаточным для изображения с высоким контрастом самых мелких зон в пределах расчетных диаметров линз.

При изображении интерференционных колец наблюдалась сильная деформация поверхности изображения. Например, при использовании

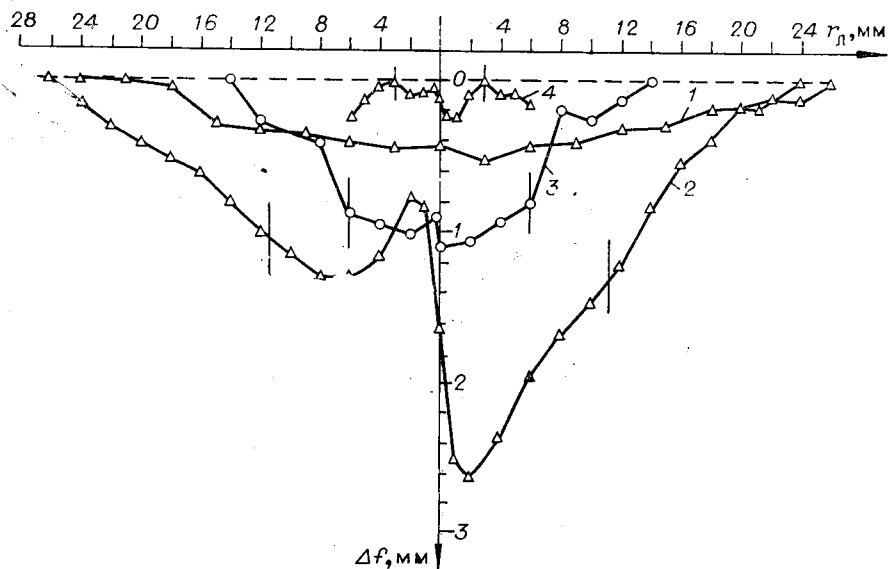


Рис. 8. Кривизна фокальной плоскости объектива «И-37» (1) и кривизна поверхности изображения колец объективами «И-37» (2, 3) и «Гелиос-40» (4) при  $t$ :  
1, 2 — 26,9; 3 — 50 мм.

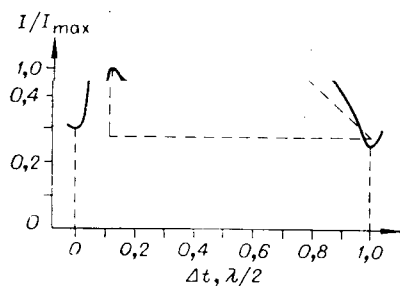


Рис. 9. Экспериментальное распределение интенсивности в пределах одного интерференционного кольца.

В пределах расчетных диаметров линз (отмечены на графиках вертикальными линиями) деформация уменьшилась с 1,8 до 0,2—0,3 мм. При фотографировании интерференционной картины фотопластинка располагалась так, чтобы кольца изображались на фотоэмульсии с наименьшей расфокусировкой.

С целью согласования экспозиции с характеристическими кривыми светочувствительных материалов было снято реальное распределение интенсивности в интерференционных кольцах. В этом случае интерферометр освещался параллельным пучком и отраженный свет регистрировался фотодиодом типа ФД-9. Результаты измерений приведены на

объектива «И-37» она достигала почти 3 мм для поля диаметром 50 мм. Кривизна поля изображения, возможно, является неплоскостью зеркал ( $\sim 0,2$  полосы) и клиновидность переднего зеркала интерферометра.

На рис. 8 приведены графики кривизны фокальной плоскости и кривизны поля изображения колец для трех практических схем. Из графиков видно, что наблюдается уменьшение деформации поля при уменьшении фокусного расстояния объектива и при увеличении длины интерферометра.

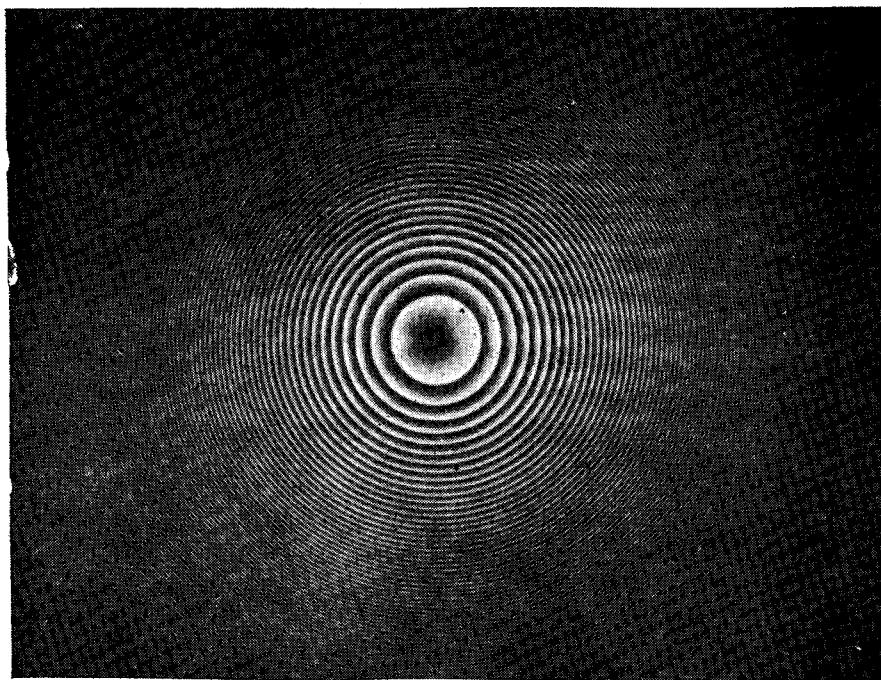


Рис. 10. Фотошаблон киноформной линзы.



тщательной настройке параллельности зеркал интерферометра удавалось снизить фон до  $\sim 22\%$ .

Рассмотренная оптическая схема и результаты исследования ее особенностей явились основой для создания установки, на которой были получены фотошаблоны киноформных линз с расчетными параметрами, приведенными выше. На рис. 10 показан один из фотошаблонов. О качестве первых киноформных линз сообщалось в нашей работе [7]. Разрешение линз близко к теоретическому; дифракционная эффективность, определенная по отношению к световому потоку, прошедшему через линзу, составила для лучших образцов  $50\%$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Франсон М. Голография. М., «Мир», 1972.
2. Лизем, Хорш, Джордан. Киноформ.— «Зарубеж. радиоэлектроника», 1969, № 12, с. 41—50.
3. Clair J. J. New methods to synthesize kinoforms.— «Opt. Commun.», 1972, vol. 6, N 2, p. 135—137.
4. Троицкий Ю. В. Отражающий интерферометр на основе согласованной металлической пленки.— «Письма в ЖЭТФ», 1970, т. 11, с. 281—284.
5. Goldina N. D., Troitsky Yu. V. Generation of asymmetric interference fringes in reflected light.— In: Opt. Inf. Proc., N. Y.—L., Plenum Press, 1976.
6. Толанский С. Спектроскопия высокой разрешающей силы. М., ИЛ, 1955, с. 347.
7. Koronkevich V. P., Lenkova G. A., Mikhailtsova I. A., Remesnik V. G., Fateev V. A., Tsukerman V. G. Kinoform optical elements.— In: Opt. Inf. Proc. N. Y.—L., Plenum Press, 1976.

Поступила в редакцию 10 февраля 1977 г.

УДК 534.081.7

**К. И. АВДИЕНКО, В. К. САНОЖНИКОВ, В. И. СЕМЕНОВ,  
Д. В. ШЕЛОПУТ**  
(Новосибирск)

#### ФОТОУПРУГИЕ ПОСТОЯННЫЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ КРС-6

КРС-6 представляет собой устойчивый твердый раствор галогенидов галлия  $\text{TlCl}$  (70%) и  $\text{TlBr}$  (30%) [1]. Он имеет кубическую решетку типа  $\text{CsCl}$  с пространственной группой  $\text{Pm } 3m$ . Кристалл прозрачен для света с длинами волн от 400 до 30 000 нм. Имея большой коэффициент преломления ( $n=2,295$  для  $\lambda=0,6328$  мкм) и малую скорость звука, он является перспективным материалом для акустооптики. Однако попытки использовать КРС-6 в акустооптических (АО) устройствах наталкивались на трудности, связанные с плохой воспроизводимостью характеристик АО устройств. Предварительные результаты, полученные авторами данной работы [2], не согласовывались с результатами зарубежных авторов [3, 4], так же как и результаты последних не согласовывались между собой.