

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОКУСАТОРОВ В КОЛЬЦО И В ДВЕ ТОЧКИ

А.В. Волков, Н.Л. Казанский, Г.В. Успенъев
Институт систем обработки изображений РАН

Введение

В статье сообщается об изготовлении и исследовании двух дифракционных оптических элементов (ДОЭ), предназначенных для фокусировки лазерного излучения в кольцо и в две точки. Изготовление фотошаблонов для дифракционного оптического элемента, фокусирующего лазерное излучение ближнего ИК-диапазона в кольцо, выполнялось сотрудниками Института автоматики и электрометрии СО РАН (г. Новосибирск), изготовление фотошаблонов для ДОЭ, фокусирующего лазерное излучение в две точки, - ведущим инженером Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН В.А. Даниловым. В Институте систем обработки изображений РАН осуществлялось изготовление и исследование оптических элементов. Полученные результаты и дальнейшее сотрудничество подтвердили целесообразность кооперации при изготовлении высокоэффективных и экспортноспособных ДОЭ.

1. Изготовление фотомасок ДОЭ

Дифракционные оптические элементы, предназначенные для фокусировки лазерного излучения в заданную область пространства с требуемым распределением интенсивности в ней (фокусаторы лазерного излучения), широко и детально освещены в отечественной и зарубежной научной литературе [1,2]. Специфика рассматриваемых фокусаторов в кольцо и в две точки заключается в том, что они рассчитаны на рабочую длину волны лазерного излучения $\lambda=1,06$ мкм и имеют по требованию заказчика значительную рабочую апертуру диаметром $A=20$ мм и относительно короткое фокусное рас-

стояние F 150 мм. В этом случае при изготовлении 8-ми уровневого ступенчатого микрорельефа минимальная ширина линий r_{\min} на крайних зонах фотошаблонов элемента может достигать 2,5 мкм [3]:

$$r_{\min} = \frac{\lambda F}{A} \cdot \frac{1}{M}, \quad (1)$$

здесь M – количество уровней градации фазы. С учетом круговой симметрии фокусаторов разрешение оборудования для записи фотошаблонов должно быть не менее $1/10$ ширины линии, т.е. не хуже 0,2 мкм. Ясно, что такое разрешение на современном уровне может дать только электронно-лучевая литография и в последнее время интенсивно развивающаяся лазерная запись фотомасок дифракционных элементов, например, на круговой лазерной записывающей системе (КЛЗС), созданной в Институте автоматики и электрометрии СО РАН [4,5]. Оптическая система КЛЗС фокусирует лазерное излучение длиной волны $\lambda = 514$ нм в пятно диаметром 0,9 мкм, а прецизионная сканирующая система обеспечивает перемещения лазерного пучка вдоль подложки с точностью 0,1 мкм. Поскольку запись происходит по кругу, то для осесимметричных ДОЭ, таких как линзы, аксиконы, некоторые фокусаторы и компенсаторы достигается практически абсолютная точность воспроизведения линии на зоне. Заполнение круговых линий в пределах одной зоны происходит с перекрытием штрихов для достижения максимальной контрастности и точности воспроизведения зон ДОЭ. Набор фотошаблонов для фокусатора в кольцо с параметрами, приведенными в таблице 1, был изготовлен на основе технологии записи на хромированных стеклянных подложках.

Таблица 1

Входной пучок:		Выходной пучок:		Фотошаблон фокусатора:	
Длина волны, мкм	1,06	Диаметр выходного пучка, мм	20	Устройство вывода шаблонов	Круговая лазерная записывающая система
Диаметр входного пучка, мм	20	Фокусное расстояние, мм	150-200	Способ кодирования фазы	Дихотомический
Модовый состав	одномодовый равномерный	Конфигурация кривой в фокальной области,	кольцо, две точки	Количество шаблонов в наборе	3
Мощность излучения, Вт	100	Диаметр кольца, мм	3	Материал шаблонов	стекло, покрытое хромом
Угол падения, град	0	Расстояние между точками, мм	10	Знаки совмещения	вложенные контуры квадратов

На рис. 1 показан фрагмент фотошаблона №3 из набора, на котором видно, что направления сканирования лазерного пучка совпадает с направлением колец, и в этом случае нет изломов линий. Незначительная неравномерность линий по ширине вызвана ошибками в подборе значений мощности лазерного пучка во время записи фотошаблона, что привело к ошибкам совмещения фотошаблонов в процессе формирования микрорельефа.

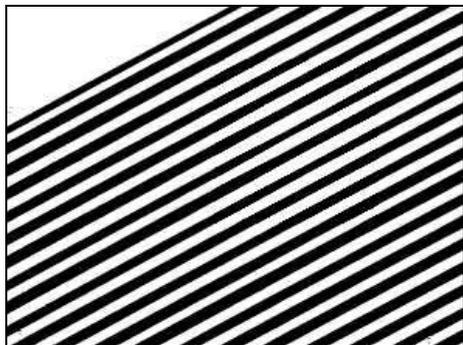


Рис. 1. Фрагмент фотошаблона фокусатора в кольцо.

Другой комплект фотошаблонов для фокусатора в две точки, параметры которого также приведены в таблице 1, был получен с помощью электронно-лучевого литографа по технологии, описанной в [6]. Запись производилась на стеклянных хромированных пластинках по электронному резисту на основе ПММА сфокусированным электронным пучком, размером 0,5 мкм, и соответствующим ему шагом перемещения вдоль подложки. Неровность края линий на фотошаблоне составила менее 10% от ее ширины. Фотография фрагмента этого фотошаблона показана на рис.2.

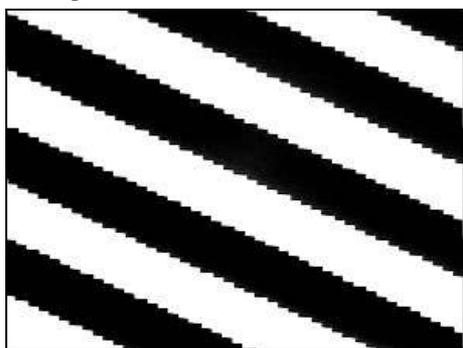


Рис. 2. Фрагмент фотошаблона фокусатора в две точки.

При изготовлении данного комплекта фотошаблонов пришлось пойти на компромисс между технологичностью изготовления фотошаблона и точностью воспроизведения изогнутой линии, поэтому эффективность работы ДОО будет ниже теоретически возможных 95%. Для обоих комплектов фотошаблонов (как для фокусатора в кольцо, так и для фокусатора в две точки) были применены стандартные знаки совмещения в виде вложенных контуров квадратов, позволяющих осуществить совмещение фотошаблонов с точностью не хуже 1 мкм.

2. Изготовление микрорельефа фокусаторов

В качестве подложки фокусаторов использовались пластинки ВРП размером 76x76 мм. После тщательной очистки пластин от механических и химических загрязнений рабочая поверхность пластин покрывалась хромом в вакуумной установке типа УВН-2М. Поверх слоя хрома наносился фоторезист марки ФП-051 КВ толщиной 1 мкм при оборотах центрифуги 5000 об/мин. Совмещение и экспонирование шаблонов осуществлялось на установке ЭМ-5006А с длиной волны актиничного излучения 436 нм и точностью совмещения 0,5 мкм. Облученные участки фоторезиста вымывались в 0,6% растворе КОН до полного открытия окон. Далее в открытых окнах защитной маски фоторезиста на установке плазмохимического травления вытравливался слой хрома, при этом защитный слой фоторезиста также стравливался, но не до конца, оставляя нетронутыми участки хрома, покрытые фоторезистом. Для более надежной защиты субстрата подложки поверх слоя хрома с открытыми окнами заново наносился слой фоторезиста и осуществлялось экспонирование пластинки с обратной стороны подложки, когда роль фотомаски выполняет уже сформированный на предыдущем шаге рисунок в хrome. Таким образом, мы имеем защитную маску, сформированную как в слое хрома, так и в слое фоторезиста. Это позволяет независимо от выбора технологии последующего травления субстрата подложки получать более вертикальные стенки микрорельефа. Слой хрома, имея более высокую адгезию к стеклу, чем фоторезист, предотвращает проникновение травящего раствора под слой защитной маски, но его одного не достаточно для длительного воздействию плазмы. Для формирования микрорельефа фокусатора была выбрана технология жидкостного химического травления как наиболее отработанная для травления субстрата подложки из обыкновенного стекла. Травление осуществлялось после контроля толщины защитной маски хрома на микроинтерферометре МИИ-4. Поскольку метод кодирования фазы является дихотомическим, то и травление подложки было неравномерным, т.е. с изменением глубины травления вдвое от шаблона к шаблону [7]. Весь фотолитографический процесс последовательно происходил, начиная с последнего фотошаблона из набора и заканчивая первым. Эта последовательность была выбрана не случайно. Узкие зоны последнего фотошаблона, накладываемые на уже сформированные ступени микрорельефа, труднее обрабатывать вследствие неравномерной толщины слоя фоторезиста в местах нахождения открываемых окон. Это приводит к варьированию ширины линий последнего фотошаблона в пределах одной зоны из-за наличия наклона боковой стенки после проявления фоторезиста. Применяя же обратную последовательность, можно уменьшить указанную погрешность, так как в начале толщина слоя фоторезиста одинакова, а на следующих шагах процесса обработки ширина линий уже значительно больше

глубины травления. После каждого шага травления, перед последующим нанесением фоторезиста, полученный микрорельеф очищался от остатков хрома, а затем вновь покрывался слоем хрома, и процесс повторялся до получения необходимого профиля микрорельефа. Результаты измерения микрорельефа фокусаторов, выполненные на микропрофилографе с вертикальным увеличением в 2000 раз (в 1 клетке – 0,4 мкм) и горизонтальным увеличением в 1 мм – 5 мкм приведены на рис. 3.

«Выбросы» и «провалы» на поверхности микрорельефов фокусаторов обусловлены недостаточной точностью совмещения фотошаблонов, вызванных ошибками технологического процесса изготовления фотомасок – нарушение ширины линии вследствие неотработанного процесса травления слоя хрома. Расчетная высота микрорельефа фокусаторов определяется по формуле:

$$h = \frac{\lambda}{(n-1)} \frac{M-1}{M} \quad (2)$$



Рис. 3. Профилограммы микрорельефов фокусаторов: а) в кольцо, б) в две точки.

В таблице 2 приведены технологические параметры фокусаторов кольцо и в две точки.

Таблица 2. Технологические параметры фокусаторов.

Наименование параметра	Фокусатор в кольцо	Фокусатор в две точки
Технология изготовления	Фотолитография	Фотолитография
Количество градаций фазы	8	8
Ширина самой узкой зоны, мкм	20	16
Материал подложки	стекло	стекло
Показатель преломления	1,5009	1,5009
Расчетная/фактическая высота микрорельефа, мкм	1,855/1,815	1,855/2,4
Расчетная/фактическая высота одной ступеньки, мкм	0,265/0,259	0,265/0,343

Отклонение максимальной высоты микрорельефа от требуемой составило: 2,2% для фокусатора в кольцо и 29% для фокусатора в две точки.

Экспериментальное исследование фокусаторов

Тестирование фокусаторов производилось на лазерном стенде (рис.4) состоящем: NdGr-лазера непрерывного излучения с длиной волны 1,06 мкм и максимальной мощностью 4 Вт - 1; кварцевого коллиматора 2; делительного стекла 3; фокусатора 4; линзы 5; датчика пироваттметра 6; телекамеры с монитором 7. Информация с пироваттметров и ка-

меры подается и обрабатывается на персональном компьютере, управляющем также прецизионным устройством перемещения датчиков в плоскости фокусировки.

Общий вид стенда изображен на рис.5. Излучение лазера 1, пройдя коллиматор на основе кварцевого стекла 2, падает на фокусатор 4. ДОО фокусирует лазерное излучение в плоскости приемника пироваттметра 6, при этом часть излучения, отобранная делительной пластиной 3, фокусируется объективом телекамеры 7.

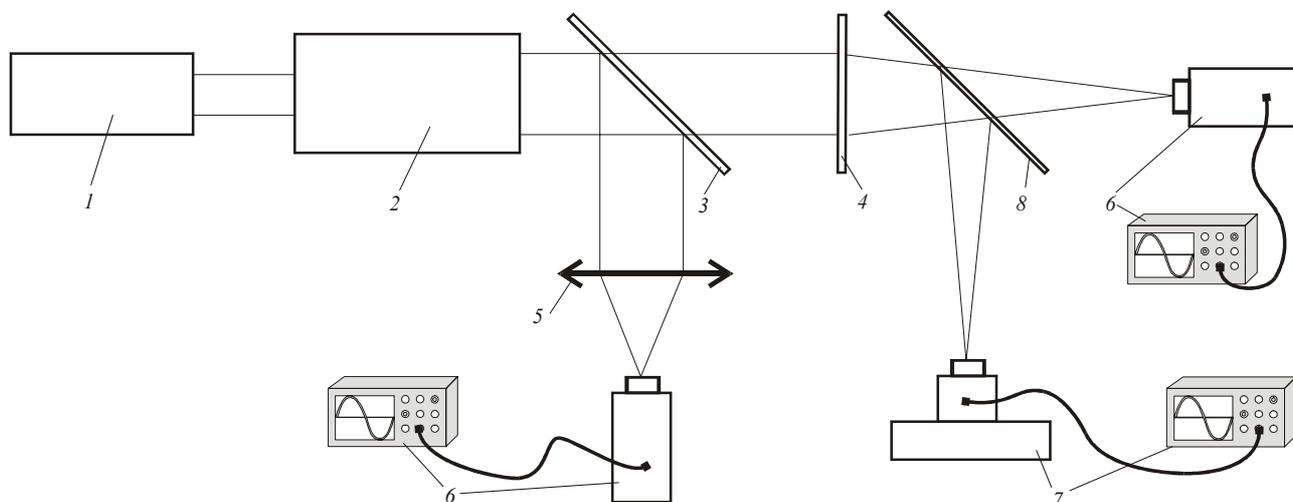


Рис. 4. Оптическая схема измерительного стенда.

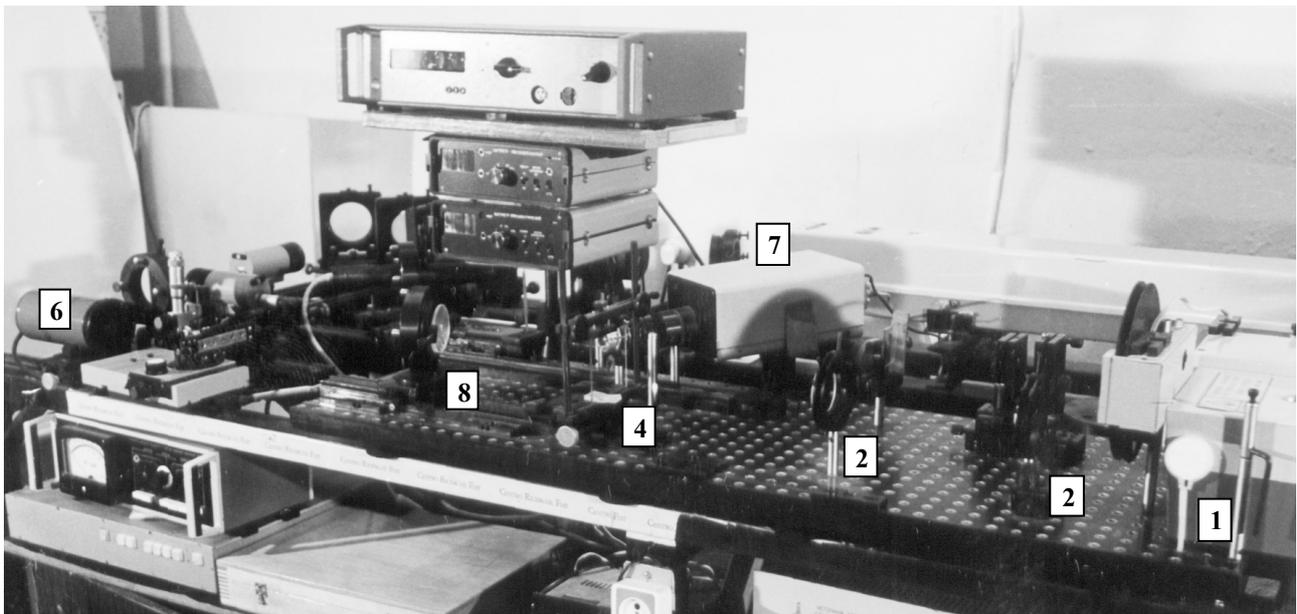


Рис. 5. Общий вид лазерного стенда с измерительной оптической системой на основе пироваттметра и телекамеры.

Измерения производятся в плоскостях: непосредственно перед фокусатором, для чего служит зеркало 3 и линза 5, устанавливаемые для измерения интенсивности падающего пучка; непосредственно после фокусатора для определения степени поглощения лазерного излучения материалом подложки фокусатора; и в плоскости фокусировки лазерного излучения на датчике пироваттметра 6. Отношение интенсивностей сфокусированного излучения к интенсивности излучения сразу же после фокусатора дает нам представление об эффективности работы фокусатора с точки зрения технологии изготовления микрорельефа, отношение интенсивностей сфокусированного и падающего пучка дает общую энергетическую эффективность фокусатора, учитывая поглощение излучения материалом подложки и отражение части излучения от поверхностей фокусатора. Благодаря описанному лазерному стенду можно не только с большой точностью измерять интенсивность лазерного пучка, прошедшего через фокусатор, и сравнивать его с интенсивностью падающего излучения, но также сканировать распределение интенсивности в области фокусировки. Для этого используются прецизионное устройство перемещения в плоскости фокусировки, датчик, улавливающий ИК излучение, или телекамера с монитором и последующим вводом изображения в компьютер. Перед датчиком устанавливалась диафрагма с апертурой 40 мкм и сканировалась поперек фокальной линии с шагом 10 мкм. График сечения распределения интенсивности излучения в фокальной области фокусатора в кольцо показан на рис.6. Исследования распределения интенсивности лазерного излучения вдоль фокальной кривой проводились на том же стенде, только вместо пироваттметра использовался датчик ИК излучения с милливольтметром.

Дифракционная ширина линии по уровню 0,3 равна 90 мкм (см. Рис. 6). По результатам измерений распределения интенсивности была произведена

оценка энергетической эффективности фокусатора. Экспериментальные данные измерения, обработанные на компьютере, показали, что доля энергии, приходящаяся на кольцо, составляет 82,5% от всей энергии, попадающей в плоскость фокусировки, а доля энергии, приходящаяся на две точки, - 85,7%. Таким образом, можно заключить, что общая энергетическая эффективность фокусатора составляет около 70%.

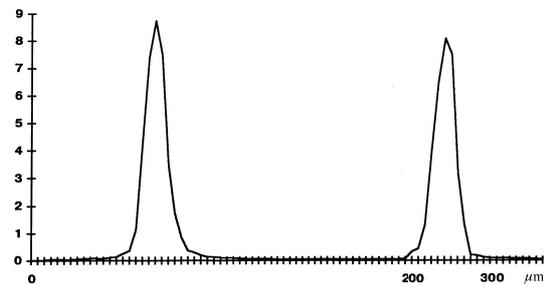


Рис. 6. Сечение распределения интенсивности фокусатора в кольцо.

Результаты работы фокусаторов, полученные с помощью телевизионной системы и обработанные на компьютере, показаны на рис.7.

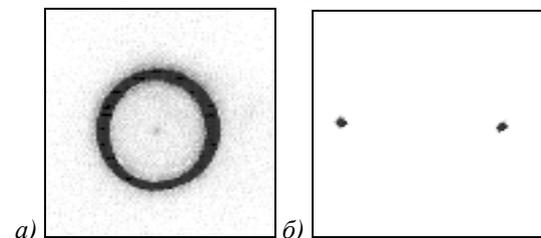


Рис. 7. Результаты работы фокусаторов: а) в кольцо и б) в две точки.

Результаты экспериментальных исследований энергетической эффективности фокусатора представлены в Таблице 3.

Таблица 3.

Плоскости измерения	Мощность лазерного излучения, Вт	
	В две точки	В кольцо
Перед диафрагмой 3	1,385	1,387
Непосредственно после фокусатора 4	1,06	1,05
В плоскости фокусировки	0,906	0,870
Энергетическая эффективность, %	85,47	82,5
Коэффициент поглощения материала подложки, %	19,78	19,78
Энергетическая эффективность с учетом поглощения стекла	65,7	62,72

Заключение

Отличие значений дифракционной эффективности (измеренной от расчетной) составляет около 20 % . Выявленные потери обусловлены технологическими погрешностями при изготовлении фокусаторов и неравномерностью освещающего пучка. В то же время следует подчеркнуть, что при изготовлении фокусаторов лазерного излучения ближнего ИК-диапазона на субстрате плавленого кварца можно поднять общую энергетическую эффективность на 10-12%.

5. Благодарность

Авторы выражают благодарность за помощь в изготовлении фотошаблонов оптических элементов сотрудникам Института автоматики и электрометрии СО РАН А.Г. Полещуку и В.В. Черкашину, ведущему инженеру Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН В.А. Данилову, сотрудникам Института систем обработки изображений РАН О.Ю. Моисееву, О.Е. Рыбакову и Ю.А. Рункову.

Литература

1. Фокусировка когерентного излучения в заданную область пространства с помощью синтеза-

рованных на ЭВМ голограмм / Голуб М.А., Карпеев С.В., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Соифер В.А. // Письма в ЖТФ. - 1981. - Т.7, вып.10. - С.618-623.

2. Golub M.A., Sisakian I.N., Soifer V.A. Infra-red radiation focusators // Optics and Lasers in Engineering. - 1991. - Vol.15, № 5. - P.297-309.
3. Соифер В.А. Введение в дифракционную микрооптику. - Самара: СГАУ, 1996. - 95с.
4. Лазерный построитель высокоинформативных изображений // ИАиЭ СО АН СССР. - Новосибирск, 1986. - 8с.
5. Точность изготовления дифракционных оптических элементов лазерными записывающими системами с круговым сканированием / В.П. Коронкевич, В.П. Корольков, А.Г. Полещук, А.А. Харисов, В.В. Черкашин // Компьютерная оптика, 1997, № 17, С.63-74.
6. Babin S., Danilov V. Fotomask fabrication of focusing diffractive optical elements using electron beam lithography // Proceedings SPIE. - 1995. - Vol. 2426 "9th Meeting on Optical Engineering in Israel", p. 215-227.
7. Спектор Б.И. Метод синтеза фазовой структуры киноформа // Автометрия. - 1985, № 6. - С.34-38.

Production and investigational study of focusators into a ring and two points

*A.V. Volkov, N.L. Kazanskiy, G.V. Uspleniev
Image Processing Systems Institute of RAS*

Abstract

The article reports on the production and investigation of two diffractive optical elements (DOEs) designed to focus laser radiation into a ring and into two points. The photomasks for the diffractive optical element focusing laser radiation of the near-infrared range into a ring was produced by the employees of the Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of RAS (Novosibirsk), the photomasks for the DOE focusing laser radiation into two points was produced by V.A. Danilov, the leading engineer of the Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of RAS. The Image Processing Systems Institute of RAS produced and investigated the optical elements. The results achieved and further cooperation proved the expediency of cooperation on the production of highly efficient and exportable DOEs.

Citation: Volkov AV, Kazanskiy NL, Uspleniev GV. Production and investigational study of focusators into a ring and two points. *Computer Optics* 1999; 19: 132-136.

References

- [1] Golub MA, Karpeev SV, Prokhorov AM, Sisakyan IN, Soifer VA. Focusing coherent radiation in a given region of space with the help of computer-generated holograms. *Technical Physics Letters*; 1981; 7(10): 618-623.
- [2] Golub M.A., Sisakyan I.N., Soifer V.A. Infra-red radiation focusators // *Optics and Lasers in Engineering*. - 1991. - Vol.15, № 5. - P.297-309.
- [3] Soifer VA. Introduction to diffractive microoptics. Samara: Samara State Aerospace University; 1996: 95.
- [4] Laser generator of highly informative images. Novosibirsk: Institute of Automation and Electrometry SB AS USSR; 1986: 8.
- [5] Koronkevich VP, Korolkov VP, Poleshchuk AG, Kharisov AA, Cherkashin VV. Accuracy of fabrication of diffractive optical elements by means of laser writing systems with circular scanning. *Computer optics*. 1997; 17: 63-74.
- [6] Babin S., Danilov V. Fotomask fabrication of focusing diffractive optical elements using electron beam lithography // *Proceedings SPIE*. – 1995. – Vol. 2426 “9th Meeting on Optical Engineering in Israel”, p. 215-227.
- [7] Spektor BI. A method for synthesizing the phase structure of kinoforms. *Avtometriya*; 1985; 6: 34-8.