

ЭЛЕМЕНТЫ ФОТОНИКИ

УДК 535.4 : 519.28

Б. Медникаров, А. Г. Полещук, Е. Г. Чуринов

*(София, Болгария — Новосибирск, Россия)*ПРИМЕНЕНИЕ ПЛЕНОК As_2S_3 ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
РЕЛЬЕФНО-ФАЗОВЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Исследовано три способа получения микрорельефа в тонких пленках As_2S_3 : многоуровневый (с применением комплекта из трех шаблонов), фоторастровый и прямого экспонирования сканирующим излучением лазера. Полученные рельефные структуры могут использоваться как дифракционные элементы в видимой и ИК-области спектра и как полутонные фотошаблоны для УФ-излучения при изготовлении дифракционных элементов в слоях органического фоторезиста методом контактного копирования. Дифракционная эффективность изготовленных элементов достигает 75 %.

Введение. Дифракционные элементы (ДЭ) — важнейшая составная часть ряда оптических и интегрально-оптических устройств: считывающих лазерных головок, элементов ввода-вывода тонкопленочных волноводов, оптических шин данных и т. д. [1—3]. Одной из проблем, стоящих при их создании, является разработка технологии изготовления фазового профиля ДЭ, форма которого приближается к пилообразной, а период составляет единицы микрон. Известны литографические способы получения такого профиля, основанные на применении органических резистов [4] и фотополимеризации.

В последнее время внимание исследователей привлекают вакуумно-напыляемые неорганические резисты на основе халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП), отличающихся хорошей оптической однородностью и высоким пространственным разрешением. При синтезе бинарных микроизображений хорошие результаты получены при использовании тонких пленок фоторезиста As_2S_3 [5]. Цель настоящей работы — исследование возможности использования напыляемого фоторезиста As_2S_3 (НФ) для получения рельефно-фазовых дифракционных элементов.

Напыляемый фоторезист As_2S_3 . Большинство пленок ХСП при поглощении электромагнитного излучения подвергаются структурным изменениям. В результате этих изменений скорость растворения экспонированных и неэкспонированных областей становится разной.

В Центральной лаборатории фотопроцессов Болгарской Академии наук разработан неорганический фоторезист вакуумного напыления As_2S_3 , который после облучения светом с длиной волны $\lambda < 550$ нм становится растворимым в щелочных растворах, что позволяет получить прямое позитивное изображение [6, 7]. Одной из самых существенных характеристик, как видно из рис. 1, является то, что за время полного растворения облученной области необлученная практически не изменяет своей толщины [8]. Резист обладает высокой разрешающей способностью. При проекционном экспонировании можно получить структуры с линейными размерами порядка 0,3 мкм. Чувствительность резиста составляет около 0,2 Дж/см² при $\lambda = 436$ нм. На рис. 2 показана характеристическая кривая НФ для разного времени прояв-

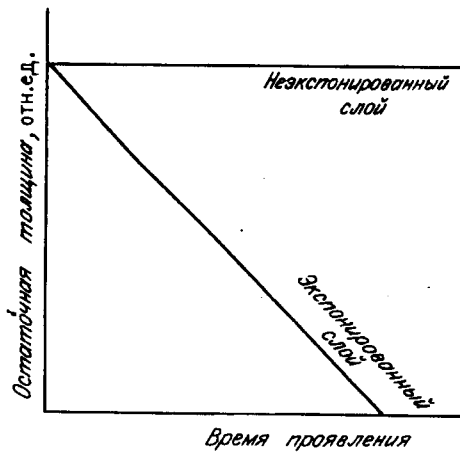


Рис. 1

мер линзы Френеля, равна $\lambda / (n - n_0)$, где λ — длина волны света, n — показатель преломления материала ДЭ, n_0 — показатель преломления окружающей среды (обычно равен 1). Используемый в настоящей работе НФ имеет $n = 3,5$. Это позволяет уменьшить толщину структуры ДЭ по сравнению с полимером или стеклом ($n = 1,5$) в 5 раз. Уменьшение максимальной толщины элемента дает возможность использовать для изготовления дифракционной структуры электронно-лучевую литографию и высокоразрешающее проекционное литографическое оборудование, имеющие малую глубину резкости.

В отличие от обычных органических резистов, наносимых на подложки методом центрифугирования, напыляемый неорганический фоторезист можно наносить на поверхности любой формы (выпуклой, вогнутой, не имеющей осевой симметрии и т. д.). Кроме того, слой резиста As_2S_3 удобно использовать для изготовления элементов рентгеновской оптики, так как он имеет большое поглощение в этом диапазоне длин волн [9].

В наших экспериментах пленки резиста наносились термическим вакуумным напылением при давлении $P < 10$ мбар на стеклянные подложки, обеспечивающие надежную адгезию.

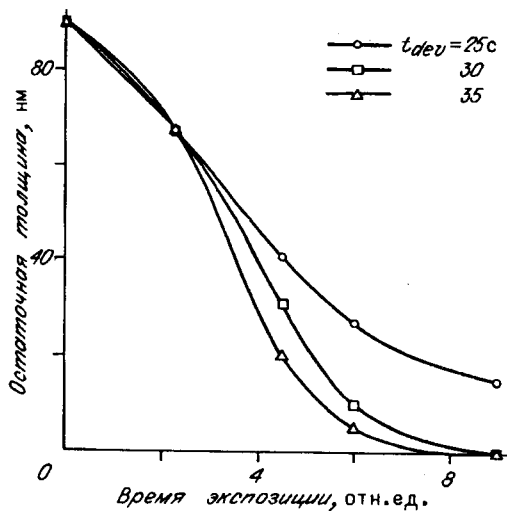


Рис. 2

ления (t_{dev}). Из нее видно, что существует достаточно большой участок с линейной зависимостью между величиной экспозиции и толщиной слоя, оставшегося после проявления. Это свойство дает возможность при подходящих экспозициях создать рельефно-фазовые структуры.

Спектральные характеристики напыленных пленок (рис. 3) позволяют использовать их в длинноволновой части спектра ($\lambda > 550$ нм) как ДЭ, работающие на прохождение, а в коротковолновой ($\lambda < 400$ нм) — как полутоновой шаблон для изготовления ДЭ методом фотолитографии.

Одним из преимуществ НФ в качестве материала для ДЭ является высокий показатель преломления. Максимальная толщина ДЭ, напри-

мер линзы Френеля, равна $\lambda / (n - n_0)$, где λ — длина волны света, n — показатель преломления материала ДЭ, n_0 — показатель преломления окружающей среды (обычно равен 1). Используемый в настоящей работе НФ имеет $n = 3,5$. Это позволяет уменьшить толщину структуры ДЭ по сравнению с полимером или стеклом ($n = 1,5$) в 5 раз. Уменьшение максимальной толщины элемента дает возможность использовать для изготовления дифракционной структуры электронно-лучевую литографию и высокоразрешающее проекционное литографическое оборудование, имеющие малую глубину резкости.

В отличие от обычных органических резистов, наносимых на подложки методом центрифугирования, напыляемый неорганический фоторезист можно наносить на поверхности любой формы (выпуклой, вогнутой, не имеющей осевой симметрии и т. д.). Кроме того, слой резиста As_2S_3 удобно использовать для изготовления элементов рентгеновской оптики, так как он имеет большое поглощение в этом диапазоне длин волн [9].

В наших экспериментах пленки резиста наносились термическим вакуумным напылением при давлении $P < 10$ мбар на стеклянные подложки, обеспечивающие надежную адгезию.

Скорость напыления и толщина пленки контролировались кварцевым резонатором, что обеспечивает получение слоев с большой оптической однородностью и воспроизводимостью толщины порядка $\pm 3\%$. Обработка экспонированных пленок осуществлялась в щелочных растворах, содержащих Na_2CO_3 , Na_3PO_4 и поверхностно активные вещества.

Методы формирования фазового профиля ДЭ. Фазовый профиль может быть сформирован путем изменения коэффициента преломления материала подложки или рельефа поверхности. Малая толщина пленки НФ (0,1—0,3 мкм) не позволяет получить набег фазы, равный 2π , при фотоструктурных изменениях под действием облу-

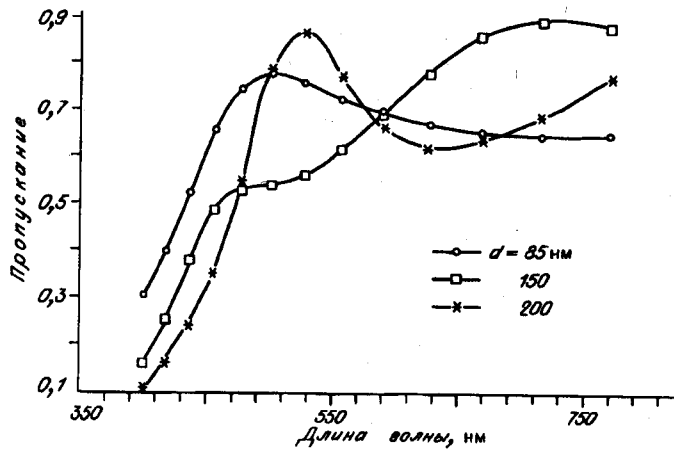


Рис. 3

чения (изменение показателя преломления $\delta n = 0,05$ при $n = 3,5$ [5]). Поэтому наиболее приемлемым способом изготовления ДЭ в тонких слоях НФ является метод создания рельефа поверхности.

Рельеф поверхности в слое НФ может быть получен как путем прямого экспонирования лазерным или электронным пучком поверхности материала, так и при помощи методов фотолитографии. В настоящей работе исследовались три способа создания рельефа в пленках напыленного фоторезиста As_2S_3 .

Фотолитографический способ. Технология создания рельефа поверхности, основанная на методе фотолитографии, включает несколько основных этапов. На первом — поверхность подложки, покрытая слоем НФ, экспонируется излучением через предварительно изготовленный фотошаблон. Далее этот слой подвергается проявлению до получения рельефа заданной глубины. Для получения рельефа с профилем, близким к пилообразному, используется комплект фотошаблонов. Комплект из N фотошаблонов позволяет получить структуру с $m = 2^N$ уровнями квантования фазы [4]. Глубина каждого последующего травления и соответственно величина экспозиции пленки должны уменьшаться в 2 раза.

При изготовлении оптических элементов этим методом решающую роль играют точность выполнения границ и совмещения шаблонов при экспонировании. На рис. 4 показан результат моделирования образования пилообразного фазового профиля в слое НФ с использованием трех шаблонов (рис. 4, а). При моделировании период пилообразной функции (рис. 4, б) брался равным 512 точкам. Среднеквадратическое значение ошибки совмещения σ_c и выполнения границ шаблонов σ_b составляло в приведенном примере соответственно 20 и 10 точек. Дифракционная эффективность (т. е. процентное содержание света в первом дифракционном порядке — η) составляет 85,6 % (при отсутствии ошибок изготовления дифракционная эффективность равна 91 % [4]). Дальнейшее увеличение ошибок σ_c и σ_b приводит к резкому падению дифракционной эффективности.

Фоторастровый способ. Одним из наиболее эффективных методов формирования рельефа является метод, основанный на использовании «полутонного» фотошаблона [10] с функцией

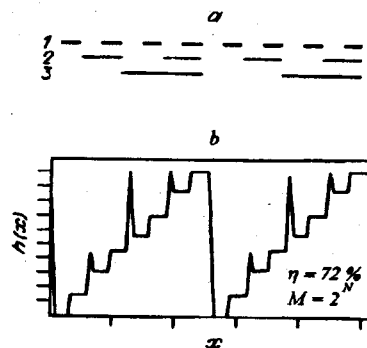


Рис. 4

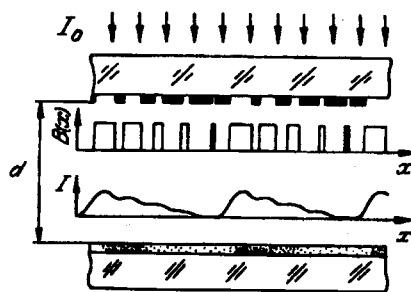


Рис. 5

сложного рельефа обычные фотошаблоны с двухградационным пропусканием, как показано на рис. 5. Дискретизация полутоновой функции $f(x)$ осуществляется с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Растриванный фотошаблон с бинарной функцией пропускания $B(x)$ освещается равномерным некогерентным световым потоком с интенсивностью I_0 . Свободное пространство длиной d за счет пространственной фильтрации осуществляет преобразование импульсного распределения интенсивности $I = I_0 B(x)$ в плавное распределение I , пропорциональное исходной функции $f(x)$. После экспонирования и проявления в слое НФ образуется рельеф с глубиной $h(x)$, как и при использовании полутонового фотошаблона.

Метод прямого экспонирования. Экспонирование слоев резиста может быть осуществлено без использования шаблонов путем строчного сканирования, когда промодулированный по интенсивности сфокусированный пучок света перемещается по поверхности резиста.

Для исследования возможности прямой записи ДЭ в пленках НФ нами использовался разработанный в Институте автоматики и электротехники СО РАН лазерный фотопостроитель [12], работающий в полярной системе координат. Экспонирование пленки производилось при непрерывном вращении подложки с частотой 9 об./с и одновременном перемещении ее по радиусу относительно записывающего пятна размером около 0,8 мкм. Модуляция излучения записывающего лазера ($\lambda = 514$ нм) производилась по закону, близкому к пилообразному.

Экспериментальные результаты. Фотолитографический способ. Комплект из трех хромовых шаблонов с периодом круговых решеток 100, 50 и 25 мкм, соответствующих рис. 6, а, был изготовлен на лазерном фотопостроителе [12]. Среднеквадратическая ошибка выполнения границ шаблонов составляла 0,5 мкм. Экспонирование пленки фоторезиста As_2S_3 толщиной

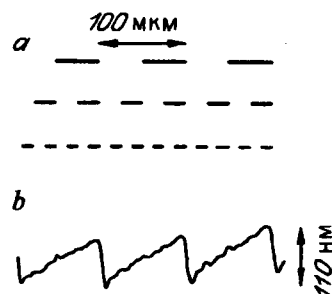


Рис. 6

пропускания $t(x) = kf(x)$, где k — коэффициент пропорциональности, $f(x)$ — аргумент комплексной функции пропускания ДЭ: $a(x) = \exp[if(x)]$. Изображение $I(x)$ фотошаблона формируется контактным или проекционным методом в плоскости подложки, покрытой фоторезистом. После проявления в слое фоторезиста образуется рельеф с глубиной $h(x) = h_0 - atI(x)$, где h_0 — толщина фоторезиста, t — время экспозиции, a — константа, определяемая из условия проявления.

Использование техники бинаризации полутоновых изображений [11] позволяет применить для формирования

сложного рельефа обычные фотошаблоны с двухградационным пропусканием, как показано на рис. 5. Дискретизация полутоновой функции $f(x)$ осуществляется с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Растриванный фотошаблон с бинарной функцией пропускания $B(x)$ освещается равномерным некогерентным световым потоком с интенсивностью I_0 . Свободное пространство длиной d за счет пространственной фильтрации осуществляет преобразование импульсного распределения интенсивности $I = I_0 B(x)$ в плавное распределение I , пропорциональное исходной функции $f(x)$. После экспонирования и проявления в слое НФ образуется рельеф с глубиной $h(x)$, как и при использовании полутонового фотошаблона.

Метод прямого экспонирования. Экспонирование слоев резиста может быть осуществлено без использования шаблонов путем строчного сканирования, когда промодулированный по интенсивности сфокусированный пучок света перемещается по поверхности резиста.

Для исследования возможности прямой записи ДЭ в пленках НФ нами использовался разработанный в Институте автоматики и электротехники СО РАН лазерный фотопостроитель [12], работающий в полярной системе координат. Экспонирование пленки производилось при непрерывном вращении подложки с частотой 9 об./с и одновременном перемещении ее по радиусу относительно записывающего пятна размером около 0,8 мкм. Модуляция излучения записывающего лазера ($\lambda = 514$ нм) производилась по закону, близкому к пилообразному.

Экспериментальные результаты. Фотолитографический способ. Комплект из трех хромовых шаблонов с периодом круговых решеток 100, 50 и 25 мкм, соответствующих рис. 6, а, был изготовлен на лазерном фотопостроителе [12]. Среднеквадратическая ошибка выполнения границ шаблонов составляла 0,5 мкм. Экспонирование пленки фоторезиста As_2S_3 толщиной 0,12 мкм осуществлялось последовательно через эти шаблоны на установке контактного копирования. Точность совмещения шаблонов составляла 2 мкм. Как видно из рис. 2, характеристическая кривая фоторезиста в большом диапазоне изменения экспозиции нелинейна. Для устранения нелинейности мы изменили время экспозиции, отклонившись от ряда $t_i = t_0/2^{i-1}$. Для времени проявления резиста 30 с экспозиция составила 180, 90 и 50 с для каждого хромового шаблона соответственно. Профилограмма полученного рельефа (измерение формы профиля в наших экспериментах проводилось на профилометре типа TAYLISTEP) показана на рис. 6, б. На

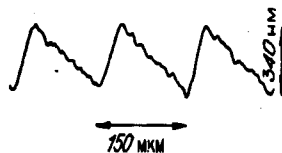


Рис. 7

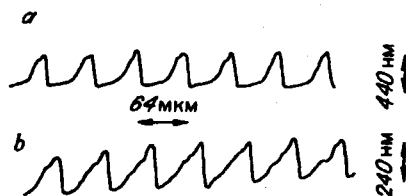


Рис. 8

рисунке видно хорошее совпадение с формой профиля, полученного моделированием, при наличии ошибок совмещения.

Фоторастровый способ. Исследовалось формирование рельефа киноформной линзы с помощью фоторастрового способа. Фазовый профиль этого ДЭ представляет собой кольцевую решетку с пилообразным профилем и переменным периодом [13]. Для бинаризации исходной функции $f(x)$ использовался алгоритм ШИМ. Хромовый фотошаблон с кольцевой структурой раstra изготавливался на лазерном фотопостроителе [12]. Период дискретизации был выбран $T = 10$ мкм. Ширина колец изменялась по пилообразному закону от 2 до 8 мкм. Общий диаметр линзы составил 50 мм. Для экспонирования напыляемого фоторезиста использовалась схема, приведенная на рис. 5. Для выравнивания освещенности применялся подвижный рассеиватель, установленный между шаблоном и источником света (ртутная лампа высокого давления). Зазор между шаблоном и слоем напыленного фоторезиста был равен $d = 20$ мкм. При меньшем значении зазора сильно возрастала волнистость рельефа, а при большем — сглаживалась пилообразная форма зон линзы. На рис. 7 приведена типичная профилограмма участка киноформной линзы в слое напыленного фоторезиста. В изготовленном элементе период зон изменялся от 70 мкм (на периферии) до 1 мм (в центральной части).

Метод прямого экспонирования. На напыленном фоторезисте толщиной 450 нм записывались решетки при скорости движения пятна 7,5 см/с. Плотность энергии, при которой наступало разрушение резиста, составляла 230 мДж/см². На рис. 8, а показана профилограмма решетки с периодом 64 мкм после проявления. Плотность энергии записи изменялась линейно в пределах одного периода от 0 до 0,8 от порога разрушения. Из данной профилограммы видно, что резист обладает нелинейным откликом на экспозицию. Близким к линейному является участок, где плотность энергии составляет 0,4—0,8 от порога разрушения. Используя этот линейный участок, удалось записать решетку с профилем, близким к пилообразному, и глубиной рельефа 240 нм. Профилограмма решетки показана на рис. 8, б.

Изготовление киноформной линзы. Пленки напыляемого фоторезиста имеют большое поглощение в коротковолновой области спектра (см. рис. 3), что дает возможность осуществлять глубокую модуляцию коэффициента пропускания в тонком слое НФ при изменении его толщины. Это свойство, позволяющее получать в слоях НФ полутоновые фотошаблоны, и было использовано нами при изготовлении киноформной линзы в

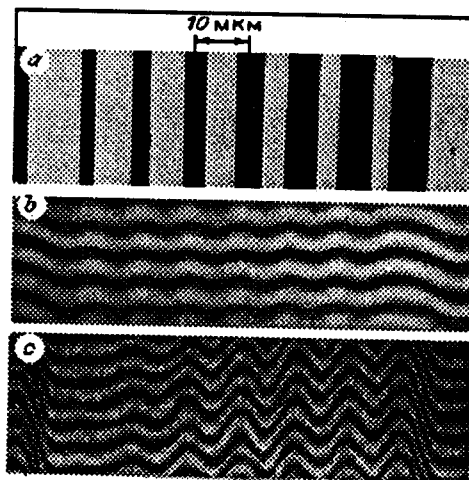


Рис. 9

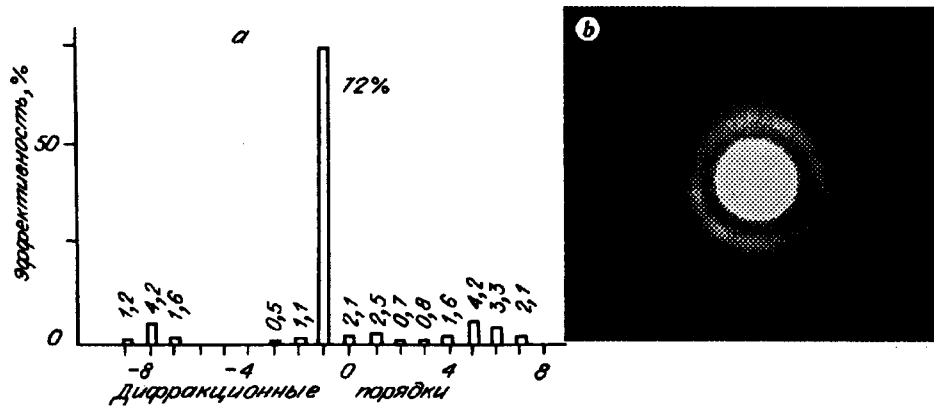


Рис. 10

слое органического резиста. После экспонирования с зазором пленки НФ через растриванный хромовый шаблон и последующего проявления получается полутоновой шаблон. Затем методом контактного копирования с помощью стандартного фотолитографического оборудования осуществляется преобразование функции пропускания полутонового шаблона $f(x)$ в функцию рельефа $h(x)$ в слое обычного органического фоторезиста. В экспериментах использовался фоторезист ФП-051 [14] с толщиной слоя около 1,8 мкм, нанесенный на стеклянную подложку методом центрифугирования. На рис. 9 показаны фрагменты растриванного шаблона с ШИМ (а), микроинтерферограммы поверхности полутонового шаблона (напыленный фоторезист) (b) и поверхности киноформной линзы в органическом резисте (с). При сравнении формы рельефа в напыленном и органическом резистах видно значительное увеличение глубины структуры. Дифракционная эффективность изготовленных образцов определялась временем экспозиции и достигала 72 %. На рис. 10 приведено типичное измеренное нормированное распределение интенсивности светового потока по дифракционным порядкам одной из изготовленных линз (а) и фотография ее кружка рассеяния (b).

ВЫВОДЫ

Показана возможность применения напыленного фоторезиста As_2S_3 для изготовления рельефно-фазовых дифракционных элементов. Исследовано три способа получения микрорельефа — многоуровневый, фоторастровый и прямого экспонирования. Наилучшие результаты получены последними двумя методами. Продемонстрирована возможность использования НФ в качестве полутонового фотошаблона для изготовления ДЭ в слоях органического фоторезиста. Форма профиля близка к пилообразной, и при оптимальной глубине ДЭ имеют дифракционную эффективность до 75 %. Элементы можно использовать как ДЭ при $\lambda > 550$ нм и как полутоновые шаблоны при $\lambda < 450$ нм.

Авторы выражают благодарность А. И. Малышеву за проведение работ с органическим резистом, проф. И. Малиновскому и проф. В. П. Коронкевичу за внимание и поддержку работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Goto K., Mori K., Hatakoshi G. et al. Spherical grating objective lenses for optical disk pick-up // *Jap. J. Appl. Phys.*—1987.—26, Suppl. 26-4.—P. 135.
2. Sauer F. Fabrication of diffractive reflective optical interconnects for infrared operation based on total internal reflection // *Appl. Opt.*—1989.—28, N 2.—P. 386.
3. Jahns J., Walker S. J. Imaging with planar optical system // *Opt. Commun.*—1990.—76, N 5.—P. 313.
4. Swanson G. J., Veldkamp W. B. Diffractive optical elements for use in infrared systems // *Opt. Eng.*—1989.—28, N 6.—P. 605.

5. Mednicarov B., Poleshchuk A. G., Churin E. G., Yurlov Yu. I. Application of an evaporated photoresist (As_2S_3) in the production of kinoform optical elements // *J. Imag. Sci.*—1986.—30, N 3.—P. 132.
6. Pat. 4458008 US /I. Konstantinov, B. Mednicarov, M. Sahatchieva, A. Buroff.—Publ. 1984.
7. Pat. 4499173 US /I. Konstantinov, B. Mednicarov, M. Sahatchieva, A. Buroff.—Publ. 1985.
8. Mednicarov B. Evaporated As_2S_3 — reproduction fidelity for microelectronics // *Solid State Techn.*—1984.—27, N 5.—P. 177.
9. *X-ray Microscopy* /Ed. G. Sehmahl, D. Rudolph.—Berlin e. a.: Springer, 1984.—(Springer Ser. in Opt. Sci.; 43).
10. Коронкевич В. П., Ремесник В. Г., Фатеев В. А., Цукерман В. Г. Киноформные оптические элементы в пленках халькогенидных стеклообразных полупроводников // *Автометрия.*—1976.—№ 5.
11. Полецук А. Г. Изготовление элементов дифракционной оптики с помощью полутоновой и фоторастровой технологий // *Автометрия.*—1991.—№ 3.
12. Коронкевич В. П., Ленкова Г. А., Михальцова И. А. и др. Киноформные оптические элементы: методы расчета, технология изготовления, практическое применение // *Автометрия.*—1985.—№ 1.
13. Lesem I., Hirsch P., Jordan J. The kinoform: A new wave front reconstruction device // *IBM J. Res. and Develop.*—1969.—13, N 3.—P. 150.
14. Введение в фотолитографию /Под ред. В. П. Лаврищева.—М.: Энергия, 1977.

Поступила в редакцию 5 апреля 1993 г.