

СРЕДЫ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ

УДК 535.3 : 535.4 : 539.213

В. П. КОРОНКЕВИЧ, В. Г. РЕМЕСНИК, В. А. ФАТЕЕВ,
В. Г. ЦУКЕРМАН
(Новосибирск)

КИНОФОРМНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ В ПЛЕНКАХ ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ СТЕКЛООБРАЗНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Киноформ — фазовый элемент переменной оптической толщины, преобразующий волновой фронт света по заданному закону для получения изображения с минимальными потерями световой энергии. Изменения оптической толщины в киноформе не превышают длины волны и в общем случае рассчитываются с помощью ЭВМ.

Известно несколько способов получения киноформов [1—5]. Как правило, переменная оптическая толщина достигается за счет поверхностного рельефа в отбеленных фотопластинках или фоторезистах. Эти способы очень трудоемки, так как промежуточные этапы проявления, закрепления, отбеливания или травления затрудняют получение строго заданных профилей и высоты фазового рельефа. Кроме того, неровная поверхность отбеленных или протравленных участков материала ведет к значительному рассеянию света.

Новые возможности изготовления киноформов представляют пленки халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП). Для этих пленок запись фазового рельефа можно осуществлять управляемым от ЭВМ световым пучком. Последующие операции обработки материала полностью исключаются.

Выбор халькогенидных пленок определялся следующими соображениями:

1. В пленках ХСП под действием света происходят изменения показателя преломления на величину $\Delta n \sim 0,1$ [6].
2. Большое значение Δn позволяет получать фазовые сдвиги до 2π в пленках толщиной 6—8 мкм. Это дает возможность записывать фазовые профили с достаточно хорошим разрешением (собственная разрешающая способность ХСП превышает 5000 лин/мм).
3. Запись киноформных оптических элементов можно производить в реальном масштабе времени, контролируя величину фазовых сдвигов во время записи.
4. Пленки ХСП не требуют проявления и закрепления, так как структурные изменения происходят непосредственно в процессе экспонирования.

При проведении эксперимента пленки ХСП толщиной 4—8 мкм приготавливались по обычной методике электронно-лучевого напыления в вакууме. В качестве подложек было выбрано полированное оксидное

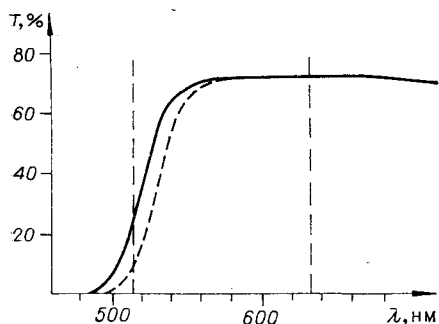


Рис. 1. Спектральная характеристика пропускания пленки As_2S_3 толщиной 6 мкм. (Пунктирная линия — пропускание пленки T после экспозиции.)

ую сторону и увеличению показателя преломления. Для излучения гелий-неонового лазера ($\lambda=632,8$ нм) пленки As_2S_3 прозрачны и в облученном участке для этой длины волны наблюдается практически чисто фазовая модуляция. Структурные изменения в пленке при этом не происходят, так как поглощение для $\lambda=632,8$ нм отсутствует. [Большая величина коэффициента отражения (27%) в спектральной характеристике пропускания на рис. 1 обусловлена высоким показателем преломления пленок As_2S_3 ($n \approx 2,6$).] Таким образом, фазовые оптические элементы для красной области спектра можно изготавливать, облучив пленку зеленым светом аргонового лазера.

Характерная зависимость изменения показателя преломления пленки от экспозиции для $\lambda=514,5$ нм приведена на рис. 2. Зависимость выполняется в диапазоне температур до $100^\circ C$. При больших мощностях облучения, когда не успевает происходить теплоотвод, температура в облучаемом участке может подняться выше этого значения и частично стереть записанную информацию [6].

В качестве первого объекта для записи был выбран простейший киноформный элемент — призма (рис. 3). Если плоский волновой фронт проходит сквозь пленку, показатель преломления которой изменяется вдоль одной координаты по пилообразному закону, и если в местах разрыва разность фаз равна 2π , то фронт волны развернется на угол ϕ и пленка будет работать эквивалентно стандартной призме, осуществляющей излом оси визирования. Математически пилообразная фазовая решетка может быть представлена сверткой пребенки Дирака с шагом a с «треугольной» функцией. Амплитуда дифракции света в направлении ϕ равна произведению гребенки Дирака, шаг которой $(\lambda/a)f$ (f — расстояние от элемента до экрана), на Фурье-преобразование треугольной функции.

При малых углах ϕ разность хода двух лучей, прошедших сквозь пленку с линейно-возрастающим показателем преломления, равна $\phi x - (\Delta n dx/a)$, где x — расстояние между лучами, d — толщина пленки, a — период пилообразной функции, Δn — величина изменения показателя преломления в точках разрыва фазы. Тогда амплитуда дифрагированной волны дается выражением [4]

стекло. Известно, что, варьируя состав компонент, можно получать пленки, край собственного поглощения которых лежит в любой части видимого спектра от 0,4 до 1 мкм. В наших экспериментах использовались пленки состава As_2S_3 , край собственного поглощения которых соответствует длине волны аргонового лазера ($\lambda=514,5$ нм) (рис. 1). Экспонирование излучением этой длины волны позволяет производить структурные изменения по всей глубине пленки. Структурные изменения приводят к сдвигу края собственного поглощения в длинноволновую

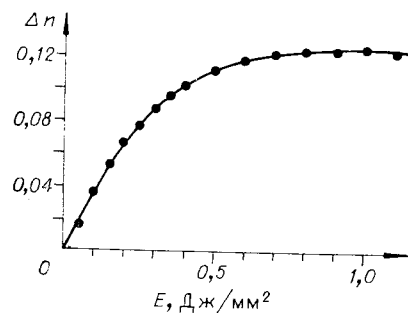


Рис. 2. Зависимость величины изменения показателя преломления (Δn) пленки As_2S_3 от экспозиции (E). Экспонирование проводилось лучом Аг лазера ($\lambda=514,5$ нм).

$$F(\varphi) = e^{j \left[k \left(\varphi - \frac{\Delta n d}{a} \right) \frac{a}{2} \right]} \frac{\sin \left[k \left(\varphi - \frac{\Delta n d}{a} \right) \frac{a}{2} \right]}{k \left(\varphi - \frac{\Delta n d}{a} \right) \frac{a}{2}},$$

$F(\varphi)$ имеет максимум при $\varphi = \Delta n d / a$. Для пилообразного закона изменения фазы, при выполнении условия на разрыв фазы $\Delta n d = \lambda$, положение этого максимума совпадает с положением дифракционного максимума от периодических разрывов фазы. Тогда

$$F(\varphi) = e^{j \pi \left(\frac{\varphi a}{\lambda} - 1 \right)} \frac{\sin \left[\pi \left(\frac{\varphi a}{\lambda} - 1 \right) \right]}{\pi \left(\frac{\varphi a}{\lambda} - 1 \right)}.$$

Из выражения видим, что имеется единственный порядок дифракции в направлении $\varphi = \lambda / a$, или, более точно, $\operatorname{tg} \varphi = \lambda / a$.

Для изготовления призмы использовался способ сканирования треугольной маской (рис. 4). Широкий коллимированный пучок от аргонового лазера направлялся на маску с вырезанным в ней треугольником. Изображение этой маски проектировалось микрообъективом на

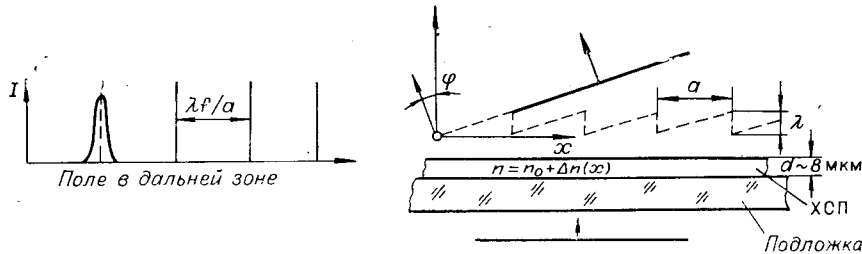


Рис. 3. Принцип действия киноформа-призмы.

пленку, которая равномерно перемещалась параллельно одному из катетов треугольника. В результате экспонировался фазовый профиль, соответствующий форме маски и отклику среды.

На рис. 5, а приведена полученная с помощью ширинг-микробиинтерферометра фотография участка пленки с фазовым профилем. Ширина полосы составляет 50 мкм. Поскольку в ширинг-интерферометре наблюдается интерференция волн от изображений объекта, сдвинутых друг относительно друга, то на рис. 5, а видны два профиля фазы с разным знаком. Так как для треугольной маски величина экспозиции возрастает от одного края к другому линейно, то форма полосы на интерферограмме представляет зависимость изменения показателя преломления от экспозиции (ср. с рис. 2), т. е. является характеристикой материала.

Для получения пилообразного профиля маска была изменена. Гипотенуза треугольника заменена кривой, учитывающей нелинейную характеристику Δn от E . Полученный таким образом профиль фазы показан на рис. 5, б, слева. Справа на этом же рисунке виден край кинофор-

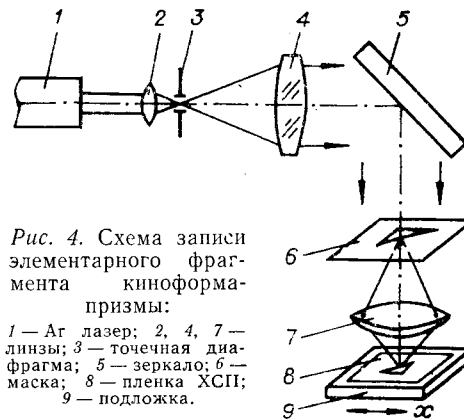


Рис. 4. Схема записи элементарного фрагмента киноформа-призмы:

1 — Ar лазер; 2, 4, 7 — линзы; 3 — точечная диафрагма; 5 — зеркало; 6 — маска; 8 — пленка ХСП; 9 — подложка.

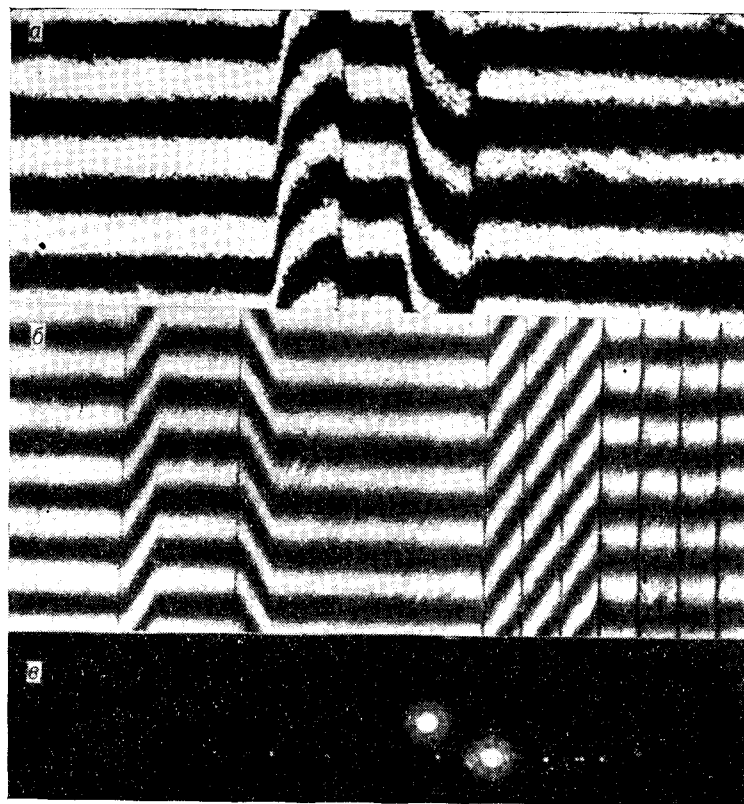


Рис. 5. Киноформная призма:

a — микрофотография участка пленки As_2S_3 с записанным на ней фазовым профилем, иллюстрирующая нелинейность отклика среды; *b* — треугольный фазовый профиль элементарного фрагмента киноформа (слева); киноформная призма, набранная из треугольных профилей (справа); *в* — отклонение луча He-Ne лазера призмой. Верхняя точка — луч, прошедший сквозь пленку, без призмы, нижние — отклоненный призмой луч и слабые дифракционные порядки.

ма-призмы, набранный последовательным сканированием исправленной треугольной маской. Для призмы выполнено условие разрыва фазы на 2π , так что линии наклона интерференционных полос в отдельных полосках сливаются в одну. Эти линии характеризуют наклон волнового фронта для света, прошедшего пленку.

Эффективность работы киноформной призмы зависит от точности выполнения разрыва фазы и от размеров области разрыва по отношению к размерам всей полосы. Несоответствие разрыва фазы 2π и нерезкость края элемента вызывают ложные дифракционные порядки. Эффективность отклонения луча лазера ($\lambda = 632,8$ нм) призмой в нашем случае составила 96% при угле отклонения $\sim 1^\circ$ (эффективность измерялась как отношение интенсивности света, отклоненного призмой, к интенсивности света, прошедшего через пленку без призмы). На рис. 5, *в* приведена фотография, иллюстрирующая работу призмы. Верхняя точка — луч света, прошедший сквозь пленку без призмы, нижние — отклоненный призмой луч и слабые дифракционные порядки.

Очевидно, что киноформные структуры рассчитаны на одну определенную длину волны. Поэтому большое значение имеет зависимость $\Delta\pi$ от длины волны (рис. 6), которая определяет величину сдвига фазы в облученном участке для разных длин волн. На рис. 7, *a* приведена экспериментальная зависимость эффективности отклонения света различных длин волн киноформной призмой, рассчитанной для $\lambda = 632,8$ нм. Распределение дифракции света по углам для двух длин волн приведено

на рис. 7, б. Эти графики иллюстрируют тот факт, что при несоответствии разрыва фазы 2π соответствующие участки киноформа работают как дисперсионный элемент.

Для записи киноформной цилиндрической линзы была изготовлена более сложная маска из 12 «треугольников» (рис. 8, а), моделирующих по расположению зоны Френеля. С помощью такой маски была изготовлена киноформная цилиндрическая линза (см. рис. 8, б). Рис. 8, в иллюстрирует мультиплицирование щели растром из пяти цилиндрических линз.

Вторым способом записи фазовых элементов было контактное экспонирование пленок через фотошаблоны и фотопленки. Использование когерентного света приводило к появлению многочисленных интерференционных полос между шаблоном и пленкой. Кроме того, при контактном экспонировании через фотошаблон проявлялась зернистая структура пленки, приводящая к большому рассеянию света. Для устранения шума, вызванного пространственной когерентностью пучка, экспонирование проводили ртутной лампой высокого давления, при этом получали чистую фазовую запись, повторяющую амплитудное пропускание объекта. Таким способом были изготовлены бинарные фазовые объекты: дифракционные решетки, зонная пластинка Френеля, случайная фазовая маска, фильтр для фазового преобразования Гильберта [7].

Фотошаблоны позволяют записывать на пленку ХСП фазовые элементы с произвольным законом изменения фазы. Для этого необходимо записать на фотопластинке соответствующее амплитудное пропускание с учетом характеристики Δn от E . Один из способов записи такого пропускания для создания киноформной сферической линзы показан на рис. 9. Пространство между окружностями, радиусы которых равны радиусам зон Френеля, частично зачерняется с учетом необходимого распределения фазы, характеристики Δn от E и характеристики фотопластинки (см. рис. 9, а). Затем полученная картина фотографируется при вращении. На фотопластинке получается необходимое распределение амплитудного пропускания (см. рис. 9, б). Таким способом были изготовлены киноформные сферические линзы диаметром 4 мм и с фокусным расстоянием 280 мм. Для увеличения апертуры линзы необходимо увеличение числа зон в фотошаблоне. Последнее можно осуществить чисто оптическим путем [8].

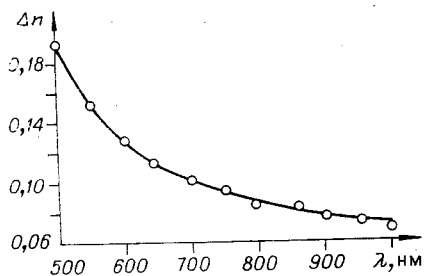


Рис. 6. Спектральная зависимость величины изменения показателя преломления (Δn) пленки As_2S_3 в облученном участке.

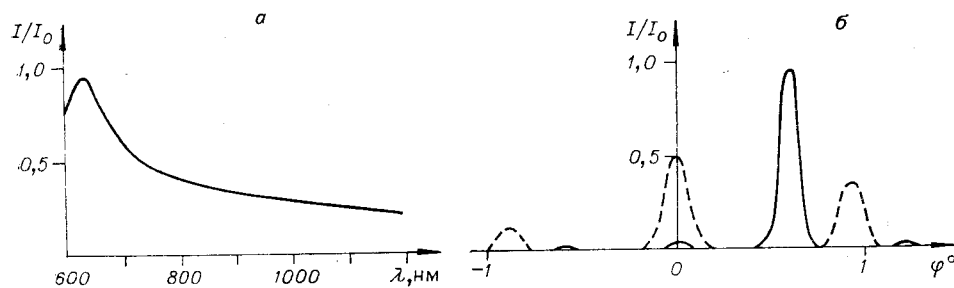


Рис. 7. Отклонение света киноформной призмой:

а — спектральная зависимость эффективности отклонения света киноформной призмой, рассчитанной на $\lambda=632,8$ нм; б — угловое распределение интенсивности света, прошедшего через киноформную призму. Сплошная линия для $\lambda=630$ нм, пунктирная — для $\lambda=900$ нм.

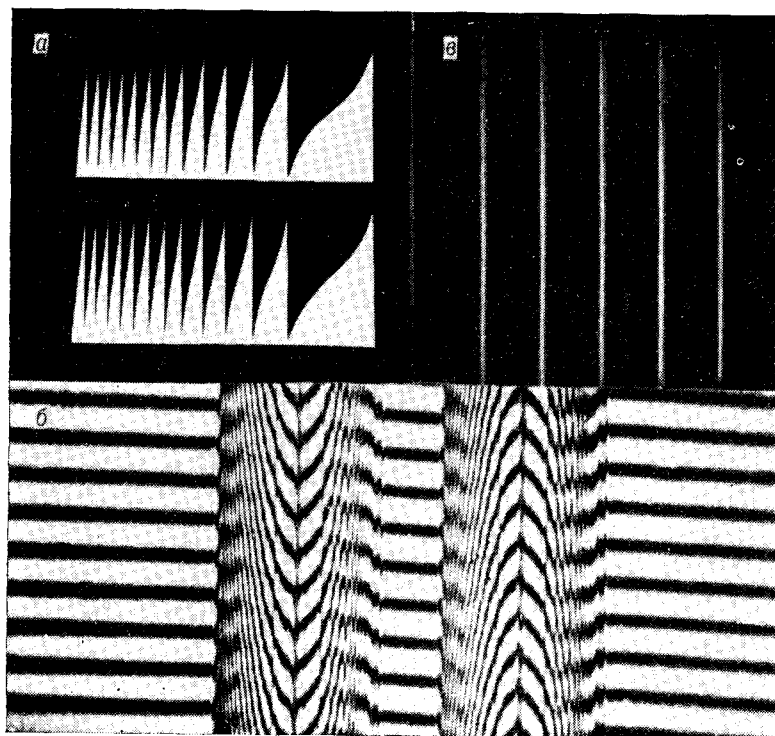


Рис. 8. Киноформная цилиндрическая линза:
a — маска для записи киноформной цилиндрической линзы; *б* — фазовый профиль киноформной цилиндрической линзы, записанной на пленке As_2S_3 ; *в* — мультиплицирование щели линзовым растром, состоящим из пяти киноформных цилиндрических линз.

Проведенная работа была нами предпринята для отработки технологии изготовления фазовых оптических элементов и способов их контроля. В дальнейшем мы предполагаем синтез элементов вести на разработанном в Институте автоматки и электрометрии, управляемом от ЭВМ фотограмметрическом автомате «Зенит» [9].

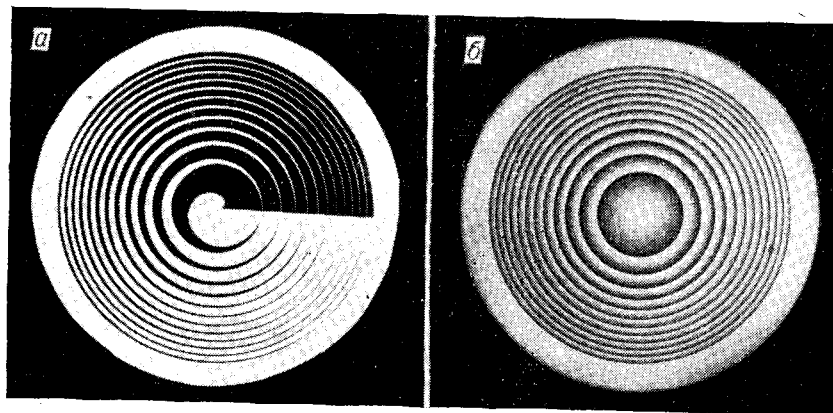


Рис. 9. Киноформная сферическая линза:
a — маска для создания фотошаблона киноформной сферической линзы; *б* — фотошаблон киноформной линзы.

ЛИТЕРАТУРА

1. L. B. Lesem, P. M. Hirsch, J. A. Jordan Jr. The kinoform: a new wavefront reconstruction device.— "IBM J. of Res. and Devel.", 1969, vol. 13, № 2, p. 150—155.
2. J. A. Jordan Jr., P. M. Hirsch, L. B. Lesem and Van. Rooy. Kinoform lenses.— "Appl. Opt.", 1970 vol. 9, № 8, p. 1883—1887.
3. J. J. Clair. New methods to synthesise kinoform.— "Opt. Comm.", 1972, vol. 6, № 2, p. 135—137.
4. J. J. Clair. Synthèse optique de filtres d'amplitude et de phase dits "Kinoform".— These de doctorat, Paris, 1972.
5. W. J. Dallas. Kinoform fabrication — a new method.— "Opt. Comm.", 1973, vol. 8, № 4, p. 340—344.
6. В. В. Корсаков, В. И. Наливайко, В. Г. Ремесник, В. Г. Цукерман. Реверсивная запись оптической информации лазерным и электронным лучами в халькогенидных стеклообразных полупроводниках.— «Автометрия», 1974, № 6, с. 24—31.
7. В. А. Арбузов, В. А. Федоров. Оптическая реализация изотропного преобразования Гильберта.— «Автометрия», 1975, № 5, с. 27—37.
8. V. P. Koronkevitch, G. A. Lenkova, I. A. Mihaltsova, V. G. Remesnik, V. A. Fateev, V. G. Tsukerman. Kinoform optical elements.— The Proc. of the American-Soviet Seminar on Optical Information Processing. N. Y., Plenum Press Corp., 1975.
9. Л. В. Бурый, В. П. Коронкевич, Ю. Е. Нестерихин, А. А. Нестеров, Б. М. Пушной, С. Е. Ткач, А. М. Щербаченко. Прецизионный фотограмметрический автомат.— «Автометрия», 1974, № 4, с. 83—89.

Поступила в редакцию 2 февраля 1976 г.

УДК 539.213

Ю. В. НЕСТЕРОВ, В. Г. РЕМЕСНИК, А. Б. РЫЖИКОВ,
В. Г. ЦУКЕРМАН
(Новосибирск)

ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕКЛООБРАЗНЫХ ПЛЕНОК СИСТЕМЫ As—S В КАЧЕСТВЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ РЕГИСТРИРУЮЩЕЙ СРЕДЫ

В связи с развитием оптических методов обработки и хранения информации возрос интерес к халькогенидным стеклообразным полупроводникам (ХСП) как реверсивным средам для записи оптической информации [1]. Большие изменения показателя преломления пленок ХСП ($\Delta n \approx 0,1$) при лазерном облучении и высокая разрешающая способность (свыше 5000 лин/мм) позволяют использовать их для записи высокоэффективных фазовых голограмм.

Однако сравнительно низкая чувствительность и изменение оптических свойств пленок после первого отжига [2] относятся к существенным недостаткам материала. Поэтому важная задача — поиск путей улучшения голографических и реверсивных свойств пленок ХСП при сохранении их достоинств. Одним из таких путей является изменение состава пленок. Например, в работах [3, 4] исследовались пленки системы As—Se, чувствительные к излучению He-Ne лазера.

В настоящем сообщении приведены результаты исследования влияния состава пленок системы As—S на изменение их оптических параметров при регистрации излучения аргонового лазера ($\lambda = 514,5$ нм).

Пленки ХСП системы As—S готовились электронно-лучевым испарением в вакууме предварительно синтезированных стекол, состав которых варьировался от As_7S_{93} до $As_{60}S_{40}$. Напыление производилось