

**А.П. Паюк, А.Ю. Мешалкин¹, А.В. Стронский,
Е.А. Акимова¹, С.А. Сергеев¹, В.Г. Абашкин¹,
О.С. Литвин, П.Ф. Олексенко, А.М. Присакар¹,
Г.М. Тридих¹, Е.В. Сенченко**

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ И ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ЗАПИСЬ ПОВЕРХНОСТНО-РЕЛЬЕФНЫХ СТРУКТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОСТРУКТУР Ge₅As₃₇S₅₈-Se КАК РЕГИСТРИРУЮЩИХ СРЕД

В работе исследованы процессы электронно-лучевой и голографической записи поверхностно-рельефных структур с использованием многослойных наноструктур Ge₅As₃₇S₅₈-Se как регистрирующих сред. Исследованы оптические свойства слоев Ge₅As₃₇S₅₈, Se и многослойных наноструктур Ge₅As₃₇S₅₈-Se. Спектральные зависимости показателя преломления проанализированы в рамках одноосцилляторной модели. С использованием зависимости Тауца определены значения ширины оптической запрещенной зоны для слоев Ge₅As₃₇S₅₈, Se и многослойных наноструктур Ge₅As₃₇S₅₈-Se. С помощью электронно-лучевой и голографической записи на многослойных наноструктурах Ge₅As₃₇S₅₈-Se получены дифракционные решетки. Также электронным лучом попиксельно было записано изображение герба Украины, размер изображения составлял 512×512 пикселей (размер одного пикселя составлял ~2 мкм). Многослойные наноструктуры Ge₅As₃₇S₅₈-Se перспективны как регистрирующие среды для записи голограммных дифракционных решеток и других оптических элементов.

Ключевые слова: многослойные наноструктуры, дифракционные решетки, голографическая запись, электронно-лучевая запись.

1. ВВЕДЕНИЕ

Эффект светочувствительности тонких пленок халькогенидных стекол был открыт пятьдесят лет назад [1]. Тонкие пленки халькогенидных стекол также чувствительны к потокам электронов, ионов и рентгеновским лучам [2-5]. Селективное травление после экспонирования делает возможным получение поверхностных рельефов и использование таких сред в качестве высокоразрешающих неорганических резистов [2, 5-7]. С использованием тонких слоев халькогенидных стекол как высокоразрешающих сред и селективного травления после экспонирования были получены голограммные дифракционные решетки с предельными характеристиками и другие оптические элементы [6, 8].

Многослойные наноструктуры на основе халькогенидных стекол и возможность использования их как регистрирующих сред были предложены в [9]. В отличие от получения поверхностного рельефа с использованием селективного травления, на таких средах возможно получение поверхностного рельефа непосредственно в процессе записи [9-13], ибо процесс селективного травления требует контроля многих параметров – температуры, концентрации травителя, и т.п. Также травители, используемые в таких случаях, часто бывают токсичными. Поэтому разработка методов одностадийного изготовления поверхностного рельефа считается перспективной для изготовления планарных дифракционных оптических элементов. Халькогенидные стекла систем Ge-As-S характеризуются высокими значениями показателя преломления, а их нелинейно-оптические свойства на два порядка выше, чем у кварцевых стекол [14, 15]. Ранее нами была показана возможность использования многослойных наноструктур Ge₅As₃₇S₅₈-Se для записи поверхностного рельефа [12]. В настоящей работе рассмотрена прямая (без последующего селективного травления) запись голограммных дифракционных решеток и различных изображений с помощью голографической и электронно-лучевой записи на многослойных наноструктурах Ge₅As₃₇S₅₈-Se как регистрирующих средах.

© А. П. Паюк, А. Ю. Мешалкин, А. В. Стронский, Е. А. Акимова, С. А. Сергеев, В. Г. Абашкин, О. С. Литвин, П. Ф. Олексенко, А. М. Присакар, Г. М. Тридих, Е. В. Сенченко, 2015

ISSN 0233-7577. Оптоэлектроника и полупроводниковая техника, 2015, вып. 50

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Массивные стекла $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}$ были приготовлены обычным методом закалки из расплава. Исходные компоненты помещались в кварцевые ампулы, откачивались и запечатывались. Слои халькогенидов и халькогенидные многослойные наноструктуры были приготовлены компьютерно-управляемым термическим вакуумным напылением двух материалов ($\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}$ и Se) из отдельных испарителей на вращающуюся подложку и в одном вакуумном цикле напыления. Технологический процесс позволяет наносить слои и структуры с толщинами от 0,005 до 3,0 мкм. Нанесение слоев на стеклянную подложку осуществлялось через две маски (рис. 1). Толщину контролировали с помощью интерферометрического сенсора толщины на длине волны $\lambda = 0,95$ мкм. Толщина каждого нанослоя вычислялась делением общей измеренной толщины на количество слоев.

Схема поперечного сечения образцов показана на рис. 2, где 1 – стеклянная подложка; 2 – $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}$, нанесенный слой за слоем; 3 – многослойная наноструктура $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}/\text{Se}$; 4 – Se, нанесенный слой за слоем. Перекрывающаяся часть образца состоит из чередующихся нанослоев Se и $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}$, две полосы слоев Se и $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}$ перекрываются в центральной части подложки, формируя многослойную наноструктуру $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}-\text{Se}$. Внешние и внутренние полосы слоев содержат слои $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}$ и Se соответственно. Слои $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}$ и Se были также нанесены в то же время на ту же подложку соответственно через окна маски и использовались для контроля состава, а также для вычисления отношения толщины слоев в одном модуляционном периоде N (общая толщина одного нанослоя $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}$ и одного нанослоя Se). В результате были получены многослойные наноструктуры $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}-\text{Se}$ с общей толщиной ~ 3 мкм и общим числом нанослоев до 200 (100 нанослоев $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}$ и 100 нанослоев Se), а также модуляционным периодом $N \sim 30$ нм. Толщины составляющих слоев $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}$ и Se были 16 и 14 нм соответственно. Для предотвращения кристаллизации слоев Se, которые являются структурно нестабильными при нагревании и/или облучении, нагревание слоев в процессе нанесения было минимизировано посредством вращения подложки и уменьшенной температуры испарителя.

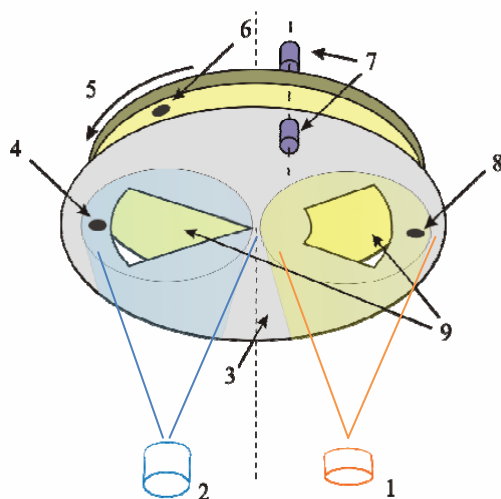


Рис. 1. Схема установки для изготовления многослойных наноструктур на основе халькогенидных стекол: 1 – испаритель халькогенидного стекла $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}$; 2 – испаритель Se; 3 – стационарная маска; 4, 8 – кварцевые измерители толщины, зафиксированные на маске; 5 – вращающийся держатель образцов; 6 – кварцевый измеритель толщины, зафиксированный на вращающемся держателе образцов; 7 – интерференционный сенсор толщины на длине волны 0,95 мкм; 9 – окна напыления.

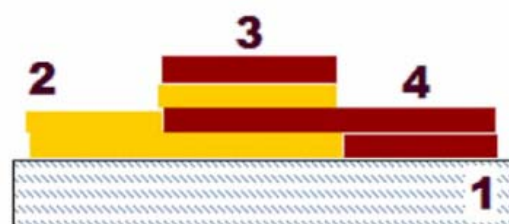


Рис. 2. Схема структуры образца: 1 – подложка, 2 – слой $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}$, 3 – многослойная наноструктура $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}-\text{Se}$, 4 – слой Se.

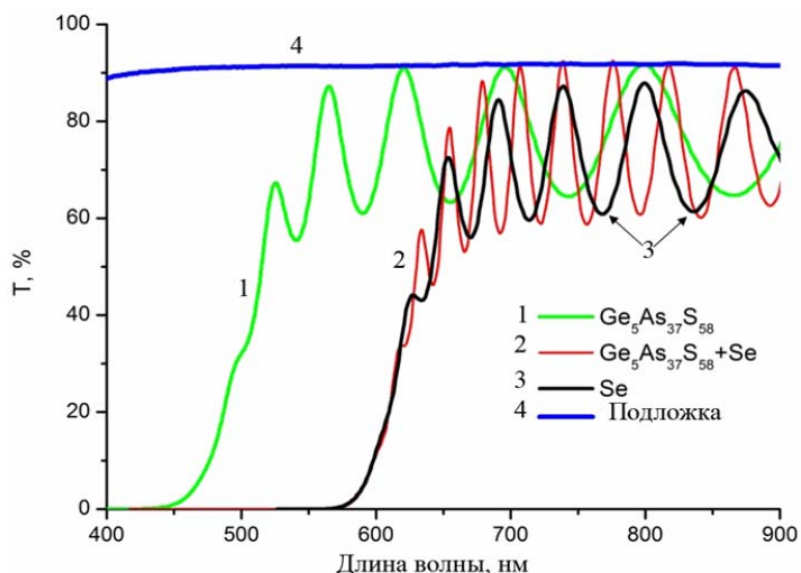


Рис. 3. Оптическое пропускание слоев $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}$, Se и многослойной наноструктуры $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}\text{-Se}$.

Полученные пленки исследовались с помощью оптической спектроскопии. Спектры пропускания (рис. 3) были измерены в области 450–900 нм с использованием спектрофотометра Specord M40 для определения спектральных зависимостей показателя преломления, толщины и оптической запрещенной зоны слоев $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}$, Se и многослойной наноструктуры $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}\text{-Se}$.

3. ЗАПИСЬ РЕШЕТОК И ИЗОБРАЖЕНИЙ

Запись голограммных дифракционных решеток проводили с помощью излучения DPSS лазера на длине волны 532 нм, дифракционную эффективность дифракционных решеток контролировали в процессе записи на длине волны 650 нм. Схема записи показана на рис. 4.

Запись электронным пучком дифракционных решеток и других оптических элементов осуществлялась с использованием сканирующего электронного микроскопа Tesla BS 300 с программным блоком управления экспозицией. Были записаны решетки с периодами 1, 2 и 4 мкм (ток луча ~4–10 нА). Также попиксельно было записано изображение герба Украины, размер изображения составлял 512×512 пикселей (размер одного пикселя ~2 мкм). Поверхностный рельеф исследовали с помощью атомно-силовой микроскопии.

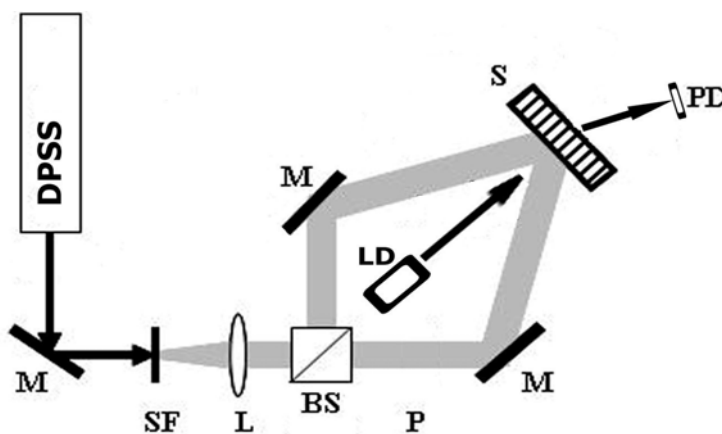


Рис. 4. Схема записи дифракционных решеток: DPSS – лазер (532 нм, 100 мВт), SF и L – пространственный фильтр и коллиматор, BS – делитель пучка 50/50, M – плоские зеркала, S – регистрирующая среда (образец), LD – лазерный диод (650 нм, 5 мВт), PD – фотоприемное устройство.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как видно из рис. 3, край поглощения многослойных наноструктур практически совпадает с краем поглощения селена (см. также таблицу).

Необходимо также отметить высокое оптическое качество слоев $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}$ и многослойных наноструктур $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}\text{-Se}$ (в местах интерференционных максимумов пропускания пленок совпадает с пропусканием подложки) и достаточно высокий уровень рассеяния в слоях селена (рис. 3). Полученные спектральные зависимости показателя преломления слоев и многослойных наноструктур были проанализированы в рамках одноосцилляторной модели, а также получены ее параметры.

В соответствии с этой моделью показатель преломления n связан с энергией падающего фотона E посредством соотношения $n^2 - 1 = E_d E_0 / (E_0^2 - E^2)$, где E_0 – энергия эффективного осциллятора и E_d – дисперсионная энергия. В этом выражении E_0 определяет положение эффективного осциллятора, связанного со средним значением запрещенной зоны (энергетического промежутка), а E_d – дисперсионная энергия, которая характеризует силу межзонных переходов. Чтобы получить значения E_0 и E_d , необходимо построить зависимости $(n^2 - 1)^{-1} = f(E^2)$ с помощью метода наименьших квадратов. В таблице приведены параметры одноосцилляторной модели – дисперсионная энергия и положение эффективного осциллятора, а также значения оптической запрещенной зоны, полученные с помощью соотношения Тауца $\alpha h\nu = \text{const}(h\nu - E_g)^2$, где $h\nu$ – энергия кванта света, α – коэффициент поглощения.

Необходимо отметить, что величины запрещенных зон слоев Se и многослойной наноструктуры $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}\text{-Se}$ близки.

Механизм оптической записи в многослойных наноструктурах связывается с фотостимулированными (или электро-, ионостимулированными) интердиффузионными процессами в халькогенидных нанослоях [16]. Предложенная модель для низкой интенсивности записывающего излучения позволила рассчитать эволюцию записываемых профилей при голографической записи. Дальнейшее развитие такого подхода было сделано в [17], где было учтено нагревание многослойной наноструктуры при облучении светом высокой интенсивности и соответствующие нелинейности процесса записи. Также отмечается, что изменение толщины в результате процессов интердиффузии в чередующихся нанослоях может достигать величин $\sim 5\%$ и выше.

На рис. 5 показано изображение поверхности голограммной дифракционной решетки с пространственной частотой 1000 мм^{-1} , полученной на основе многослойной наноструктуры $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}\text{-Se}$.

Здесь необходимо отметить, что кинетика записи голограммных решеток является поляризационно чувствительной. Также отметим, что поверхностный рельеф формируется непосредственно в процессе записи (без селективного травления после экспонирования).



Рис. 5. АСМ изображение поверхности голограммной дифракционной решетки с пространственной частотой 1000 мм^{-1} , полученной с использованием многослойных наноструктур $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}\text{-Se}$.

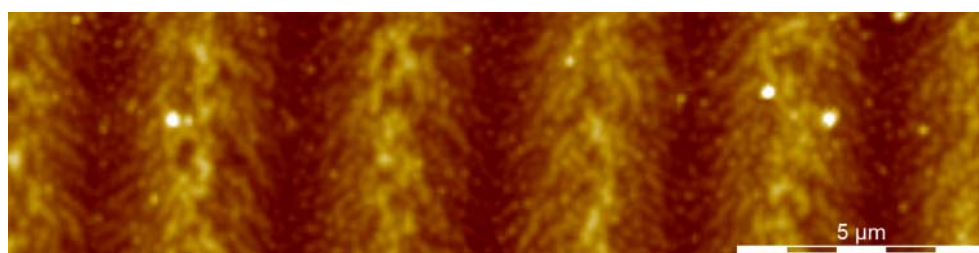
Таблица. Параметры одноосцилляторной модели и значения ширины запрещенной зоны для пленок $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}$, Se и многослойных наноструктур $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}\text{-Se}$.

| Состав | $n(0)$ | E_d , эВ | E_0 , эВ | E_g , эВ |
|--|--------|------------|------------|------------|
| Se | 2,28 | 19,09 | 4,53 | 1,91 |
| $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}$ | 2,24 | 18,29 | 4,57 | 2,27 |
| $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}\text{-Se}$ | 2,37 | 17,67 | 3,84 | 1,92 |

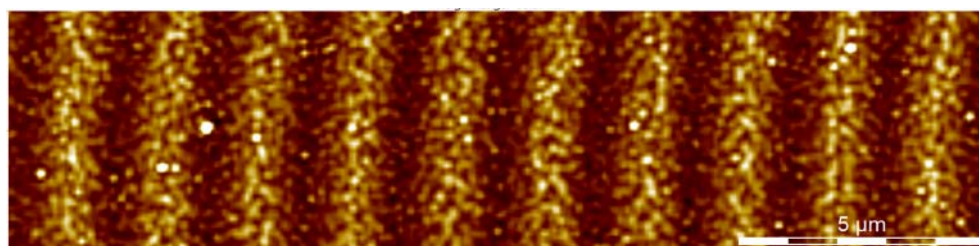
Селективное травление требует контроля многих параметров (температуры, концентрации травителя, его состава и т.п.). Кроме того, селективные травители для сред на основе халькогенидных стекол часто весьма токсичны. Поэтому разработку методов прямой и одноступенчатой записи поверхностных рельефных структур можно считать перспективной для получения планарных дифракционных оптических элементов.

В тонких пленках халькогенидных стеклообразных полупроводников при облучении потоками электронов или ионов происходят структурные изменения [2-5, 18]. Наблюдались сдвиги края поглощения или деформация поверхности при облучении электронным пучком. С помощью последующего селективного травления тонкие пленки халькогенидных стеклообразных полупроводников можно было использовать в процессах литографии с высоким разрешением. В [18] отмечается, что эффекты увеличения толщины слоя, стимулированные облучением электронным пучком, в отдельных компонентах многослойной наноструктуры (например, Se и As_2S_3) не являются аддитивными по отношению к увеличению толщины в тех же условиях облучения многослойной наноструктуры Se- As_2S_3 . Сумма увеличения толщин в отдельных слоях составляет только 30% от общего измеренного увеличения толщины в многослойной наноструктуре Se- As_2S_3 . В многослойных структурах нужно учитывать еще и наличие других процессов, например, образование As-S-Se. Полагается, что индуцированные светом и потоками электронов процессы активируют подобные структурные изменения в таких средах.

На рис. 6 приведены АСМ изображения дифракционных решеток с периодами 4 и 2 мкм, записанных электронным лучом. Дифракционная эффективность решеток достигала 1%. Качество рельефа решеток достаточно высокое. Необходимы дальнейшие исследования по оптимизации параметров многослойных наноструктур и условий записи решеток.



Период 4 мкм



Период 2 мкм

Рис. 6. Дифракционные решетки, полученные с помощью электронно-лучевой записи.

На рис. 7а показан фрагмент изображения герба Украины в виде пиксельной структуры размерами 512×512 пикселей (размер пикселя ~2 мкм). Фрагмент АСМ изображения герба показан на рис. 7б. Необходимо отметить, что высота пикселей при данных условиях записи доходит до 200–300 нм.

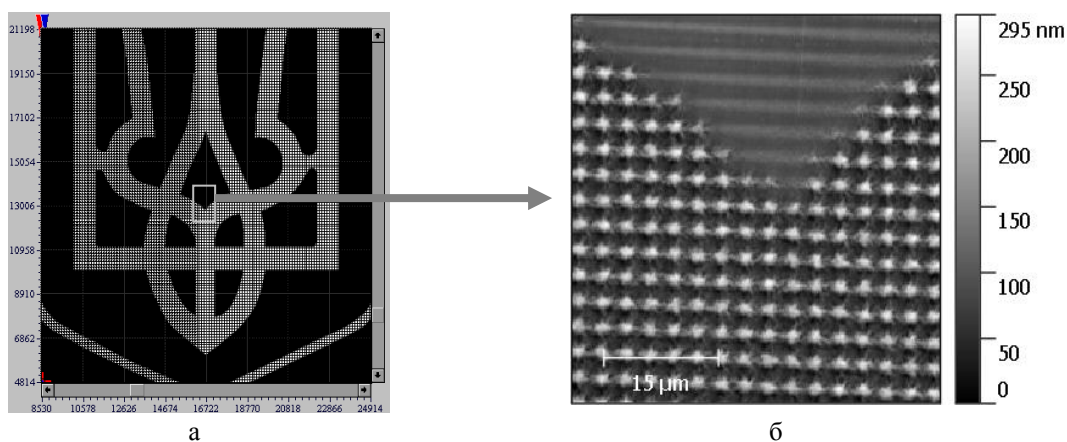


Рис. 7. (а) Фрагмент изображения герба Украины в виде пиксельной структуры; (б) фрагмент АСМ изображения герба с использованием многослойной наносистемы $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}\text{-Se}$.

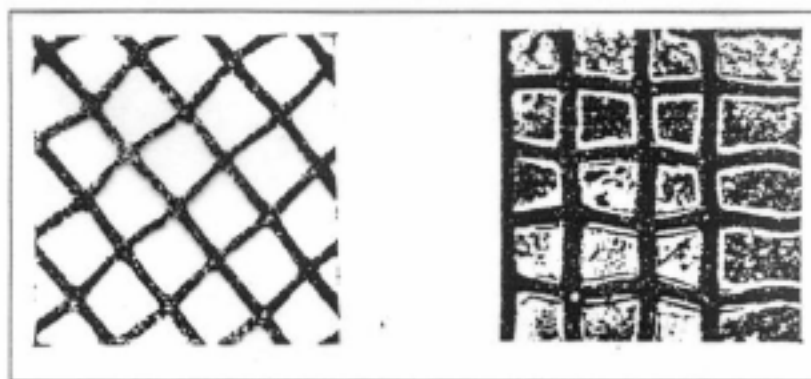
5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что с использованием многослойных наноструктур $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}\text{-Se}$ можно осуществлять прямую запись голограммных оптических элементов (дифракционных решеток), а также прямую запись электронным лучом дифракционных решеток и различных поверхностных структур.

Работа выполнена при поддержке проекта FP-7 SECURE-R21.

Работа посвящается пятидесятилетию открытия эффекта светочувствительности тонких слоев халькогенидных полупроводников:

М.Т. Костышин, Е.В. Михайловская, П.Ф. Романенко, Г.А. Сандул, О фотографической чувствительности тонких полупроводниковых слоев (Журнал Научной и Прикладной Фотографии и Кинематографии, **10** (6), с. 450-451 (1965)).



Первые в мире изображения, полученные на тонких слоях халькогенидных стеклообразных полупроводников: слева – слой Sb_2S_3 , справа – слой As_2S_3 .

A.P. Paiuk, A.Yu. Meshalkin, A.V. Stronski, E.A. Achimova, S.A. Sergeev, V.G. Abashkin, O.S. Lytvyn, P.F. Oleksenko, A.M. Prisacar, G.M. Triduh, E.V. Senchenko

E-BEAM AND HOLOGRAPHIC RECORDING OF SURFACE RELIEF STRUCTURES BY USING THE $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}$ -Se MULTILAYER NANOSTRUCTURES AS REGISTERING MEDIA

Processes of e-beam and holographic recording of surface-relief structures by using the $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}$ -Se multilayer nanostructures as registering media have been studied. Optical properties of $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}$, Se layers and $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}$ -Se multilayer nanostructures have been also investigated. Spectral dependences of refractive index have been analyzed within the frames of single oscillator model. Values of optical band gap for $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}$, Se layers and $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}$ -Se multilayer nanostructures have been determined from the Tauc dependence. Using the e-beam and holographic recording on $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}$ -Se multilayer nanostructures the diffraction gratings have been obtained. The image of state emblem of Ukraine was also obtained using the e-beam recording. The image size consisted of 512×512 pixels (size of one pixel was $\sim 2 \mu\text{m}$). The $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}$ -Se multilayer nanostructures as registering media are perspective for direct recording the holographic diffraction gratings and other optical elements.

Keywords: multilayer nanostructures, diffraction gratings, holographic recording, e-beam recording.

1. *M.T. Костышин, Е.В. Михайловская, П.Ф. Романенко, Г.А. Сандул, О фотографической чувствительности тонких полупроводниковых слоев // Журнал Научной и Прикладной Фотографии и Кинематографии. – 1965. – 10, №6. – P. 450-451.*
2. *Photoprocessing and lithographic applications / Y. Mizushima and A. Yoshikawa // Amorph. Semicond., Technologies & Devices: Tokyo e.a. Amsterdam. – 1982. – P. 277-295.*
3. *Ion-beam induced silver doping in $\text{Ag}_2\text{Se}/\text{GeSe}$ – resist system / R. Klages, A. Thomas, G. Kluge et al. // phys. status solidi (a). – 1988. – 106, № 1. – P. 57-65.*
4. *X-ray lithography with Ag-Se/GeSe inorganic resist using synchrotron radiation / K. Saito, Y. Utsigi, and A. Yoshikawa // J. Appl. Phys. – 1988. – 63, № 2. – P. 565-567.*
5. *Production of metallic patterns with the help of high resolution inorganic resists / A. Stronski // Microelectronic Interconnections and Assembly, NATO ASI Series, 3:High Technology. – 1998. – 54. – P. 263-293.*
6. *Holographic optical element fabrication using chalcogenide layers / I.Z. Induntyi, A.V. Stronski, S.A. Kostioukevitch et al. // Opt. Eng. – 1995. – 34, № 4. – P. 1030-1039.*
7. *Photosensitive properties of chalcogenide vitreous semiconductors in diffractive and holographic technologies applications / A.V. Stronski, M. Vlcek // J. Optoelectron. and Adv. Mater. – 2002. – 4, № 3. – P. 699-704.*
8. *Application of $\text{As}_{40}\text{S}_{60-x}\text{Se}_x$ layers for high efficiency gratings production / A. Stronski, M. Vlcek, A. Sklenář et al. // J. Non-Cryst. Solids. – 2000. – 266-269. – P. 973-978.*
9. *Е.Ф. Венгер, А.В. Мельничук, А.В. Стронский. Фотостимулированные процессы в халькогенидных стеклообразных полупроводниках и их практическое применение. – К.: Академперіодика, 2007.*
10. *Imaging properties of $\text{As}_{40}\text{S}_{40}\text{Se}_{20}$ layers / A.V. Stronski, M. Vlcek // Optoelectronics Review. – 2000. – 8, №3. – P. 263-267.*
11. *Surface relief grating formation in amorphous $\text{As}_{40}\text{S}_{15}\text{Se}_{45}$ and As_2S_3 films under $0.532 \mu\text{m}$ wavelength illumination / M. Reinfelde, J. Teteris, and E. Potanina // Can. J. Phys. – 2014. – 92. – P. 659-662.*
12. *Light-stimulated structural transformations and optical recording in amorphous nano-layered structures / S. Kikineshi // J. Optoelectron. and Adv. Mater. – 2001. – 3, № 2. – P. 377-382.*
13. *Amorphous chalcogenide nanomultilayers: research and development / S. Kokenyesi // Ibid. – 2006. – 8, № 6. – P. 2093.*
14. *Optical properties of nanomultilayers from chalcogenide glasses / A. Andriesh, V. Abashkin, E. Achimova et al. // 6-th Intern. Conf. on Materials Science and Condensed Matter Physics: Abstracts. – Chisinau, Moldova, 2012. – P. 206.*
15. *Imaging ellipsometry mapping of photo-induced refractive index in As_2S_3 films / C. Röling, P. Thiesen, A. Meshalkin et al. // J. Non-Cryst. Solids. – 2013. – 365. – P. 93-98.*
16. *Surface relief formation in $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}$ -Se nanomultilayers / A. Stronski, E. Achimova, A. Paiuk et al. // J. Non-Cryst. Solids. – 2015. – 409. – P.43-48.*
17. *Direct surface relief formation on As_2S_3 -Se nanomultilayers in dependence on polarization states of recording beams / E. Achimova, A. Stronski, V. Abashkin, A. Meshalkin, A. Paiuk, A. Prisacar, P. Oleksenko, G. Triduh // Optical Materials. – 2015. – 47. – P. 566-572.*
18. *Methods comparing peculiarities of surface-relief recording in amorphous chalcogenides // Roland Bohdan, Sandor Molnar and Sandor Kokenyesi // Phys. status solidi (a). – 2015. – 212, № 10. – P. 2186-2190.*

19. *Optical* characterization of As-Ge-S thin films / A.V. Stronski, M. Vlcek, I.D. Tolmachov, H. Pribylova // J. Optoelectron. and Adv. Mater. – 2009. – **11**, №11. – P. 1581-1585.
20. *Linear* and nonlinear optical properties of Ge-As-S films / I.D. Tolmachov, A.V. Stronski // Proc. SPIE. – 2008. – **7138**. – P. 71381X-1–71381X-6.
21. *Behavior* of the Electronic Dielectric Constant in Covalent and Ionic Materials / S.H. Wemple and M. DiDomenico // Phys. Rev. B. –1971. – **3**, № 4. – P. 1338-1350.
22. *The Wemple–DiDomenico* model as a tool to probe the building blocks conforming a glass / J.M. Gonzalez-Leal // Phys. status solidi B. – 2013. – **250**, № 5. – P. 1044-1051.
23. *Surface* deformations and amplitude phase recording in chalcogenide nanolayerd structures A. Kikineshi, V. Palyok, L.A. Szabo et al. // J. Non-Cryst. Solids. –2003. – **326&327**. – P. 484-488.
24. *Nonlinear* photo-diffusion in amorphous chalcogenide multilayers / I. Ivan, I.A. Szabo, and S. Kokenyesi // Defect and Diffusion Forum. – 2005. – **237-240**. – P. 1210-1215.
25. *Photon* and electron induced transformations and pattern formation in amorphous chalcogenide nano-layers / V. Takáts // Ph.D. Thesis University of Debrecen, 2012.
26. *Comparative* study of electron- and photo-induced structural transformations on the surface of As₃₅S₆₅ amorphous thin films / A. Kovalskiy, J.R. Neilson, A.C. Miller, F.C. Miller, M. Vlcek, H. Jain // Thin Solid Films. – 2008. – **516**. – P. 7511-7518.
27. *Direct* write of optical waveguides on chalcogenide thin films using electron beams / G.B. Hoffman, W. Zhou, R. Sooryakumar, and R. M. Reano // J. Vacuum Sci. & Technol. B. – 2009. – **27**. – P. 2737-2741.

Институт физики полупроводников
им. В.Е. Лашкарева НАН Украины
проспект Науки, 41,
03680 Киев, Украина
e-mail: stronski@isp.kiev.ua

Получено 04.06.2015

¹Институт прикладной физики
Академии Наук Молдовы,
ул. Академическая, 5,
MD-2028 Кишинев, Молдова