

УДК 539.21:537.1

PACS 68.55.-a, 78.30.Ly, 79.60.-i

DOI: 10.24144/2415-8038.2017.41.33-40

О.Б. Кондрат¹, Р.М. Голомб¹, А. Чік², В. Токач², М. Вереш³, Н. Цуд⁴,
В.М. Міца¹

¹Ужгородський національний університет, 88000, Ужгород, вул. Волошина, 54
e-mail: oleksandr.kondrat@uzhnu.edu.ua

²Інститут ядерних досліджень Угорської академії наук, Н-4001 Дебрецен, Угорщина

³Вігнерівський центр фізичних досліджень Угорської академії наук, 1121 Будапешт,
Угорщина

⁴Карловий університет, факультет математики та фізики, кафедра науки поверхні та плазми,
18000 Прага 8, Чехія

СТРУКТУРНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ НАНОШАРІВ As_xS_{100-x} : РЕНТГЕНФОТОЕЛЕКТРОННІ ТА ЕЛЕКТРОННОМІКРОСКОПІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методами рентгенівської фотоелектронної спектроскопії та скануючої електронної мікроскопії вивчена структура приповерхневих наночарів тонких плівок As_xS_{100-x} ($x = 40, 45, 50$) та її трансформація під дією когерентного зеленого (532 нм) лазерного опромінення. Показано, що склад отриманих плівок залежить не тільки від складу вихідного матеріалу, але також від складу пари в процесі випаровування. Лазерне випромінювання з енергією, близькою до енергії ширини забороненої зони, знижує кількість гомополярних зв'язків As-As і S-S у плівках, отриманих термічним випаровуванням стекол $As_{40}S_{60}$ та $As_{50}S_{50}$. Композиція $As_{45}S_{55}$ демонструє при опроміненні збільшення кількості зв'язків As-As, незважаючи на часткове зменшення зв'язків S-S. Спостережуваний ефект має місце внаслідок присутності структурних одиниць As_4S_3 . Для вивчення структури поверхні плівок були отримані СЕМ знімки зразків As_xS_{100-x} ($x = 40, 45, 50$), свіжонапиленних, відпалених та опромінених лазером.

Ключові слова: рентгенівська фотоелектронна спектроскопія, аморфна плівка, лазерне опромінення, скануюча електронна мікроскопія, структурні одиниці.

Вступ

Дослідження халькогенідних склоподібних напівпровідників (ХСН) сформувавши загальне уявлення про електронні явища в неупорядкованих структурах [1]. На даний час здійснено багаточисельні дослідження їх фундаментальних фізико-хімічних властивостей [2,3]. Для розробки систем оптичної обробки сигналів необхідні високоякісні оптичні елементи. Можливість високого рівня інтеграції цих елементів у оптичних мікросхемах передбачає вдосконалену технологію виготовлення для досягнення низьких оптичних втрат у приповерхневих шарах і високого рівня порогу руйнування лазера при фемтосекундних лазерних імпульсах. Висока

інфрачервона (ІЧ) пропускна спроможність або висока оптична нелінійність аморфних подвійних систем As-S роблять їх перспективним оптичним носієм для майбутніх надшвидких фотонних систем. Наші попередні Раман-дослідження бінарної системи As-S виявляють відмінності між структурами плівок As_2S_3 та об'ємним склом у наномасштабному вимірі [4]. Аналіз показує, що це зумовлено головним чином фазовим поділом, тобто внеском молекул As_4S_4 у пар під час термічного випаровування As_2S_3 . У подальших дослідженнях структури аморфних стекол As_2S_3 та плівок, проведених з використанням фотонно-залежної Раман-спектроскопії, спостерігається лазерно-індукована транс-

формація молекул As_4S_4 [5]. Тому молекули As_4S_4 можуть бути класифіковані як центри поглинання світла в структурі As_2S_3 , що призводить до збільшення оптичних втрат оптичного середовища.

Метою даної роботи є комплексне структурне дослідження поверхневих наночарів тонких плівок, одержаних з халькогенідних стекел $As_{40}S_{60}$, $As_{45}S_{55}$ та $As_{50}S_{50}$ з використанням рентгенівської фотоелектронної спектроскопії (РФС) та скануючої електронної мікроскопії (СЕМ), впливу лазерного світла з енергією, близькою до ширини забороненої зони, на структурні і композиційні зміни.

Методика досліджень

Високоякісні оптичні стекла використовувались як вихідні матеріали для осадження зразків, щоб уникнути домішок в об'ємі плівок. Об'ємні зразки As_xS_{100-x} ($x = 40, 45, 50$) були підготовлені звичайним способом гартування розплаву в евакуйованих кварцових ампулах із суміші високочистого 99,999% As та S. Наночарів одержувалися шляхом термічного вакуумного випаровування відповідних стекел і осадження на кремнієві підкладинки. Товщини отриманих плівок склали $\sim 0,7$ мкм. Зелений діодний лазер з довжиною хвилі $\lambda = 532$ нм (енергія фотона ~ 2.4 еВ) і потужністю $p = 25$ мВт, був використаний для дослідження впливу світла з енергією порядку ширини забороненої зони на структуру наночарів зразків $As_{40}S_{60}$, $As_{45}S_{55}$ та $As_{50}S_{50}$ ($E_g \sim 2.4$ еВ). Оптичне опромінення проводилось з інтенсивністю 280 мВт/см² при нормальних умовах. Інтенсивність лазера була обрана на основі наших попередніх досліджень As-S стекел за допомогою раманівської спектроскопії.

Фотоemisійні експерименти проводилися за допомогою анода $Al\ k-\alpha$ ($E = 1486$ еВ) в якості джерела рентгенівського випромінювання. Фотоелектронні спектри реєструвалися за допомогою напівсферичного аналізатора Phoibos 100. Спектри основних рівнів As 3d та S 2p вимірювалися при нормальній геометрії емісії. Окрім цього, спектри основних рівнів C 1s та O 1s були виміряні для нормалізації позицій усіх спектрів до положення графі-

тового піку (при 284,5 еВ [6]). Спектр C 1s був розкладений лише на компоненти C-C та C-O, і це узгоджується з компонентами O-C, знайденими на спектрах O 1s. Тому основні рівні C 1s та O 1s не будуть включені в подальший розгляд. Для розбивки спектрів на компоненти використана програма CASA XPS.

Для вивчення структури поверхні плівок As_xS_{100-x} ($x = 40, 45, 50$), свіжонапилені, відпалені та освітлені лазером, були отримані фотографії поверхонь за допомогою скануючого електронного мікроскопа.

Результати та їх обговорення

Рентгенівська фотоелектронна спектроскопія може бути корисною методикою для дослідження поверхні (тобто декількох верхніх шарів, до 30 ангстрем) матеріалів, а також для визначення структурних одиниць, які утворюють досліджуваний матеріал. Цей метод успішно використовувався для характеристики структури приповерхневих наночарів аморфних матеріалів [7,8]. Результати дослідження РФС поверхневих наночарів тонких плівок As_xS_{100-x} ($x = 40, 45, 50$) узагальнені на рисунку 1. Як видно, всі спектри основного рівня S 2p можуть бути розкладені на дві компоненти. Енергетичне положення компонент 1 (та їх спін-орбітальних сплітів 1') дозволяє ідентифікувати їх як структурні одиниці (с.о.) S-As₂. [9]. Ця компонента є характерною с.о. в кристалічному As_2S_3 і є основною компонентою як для стехіометричних $As_{40}S_{60}$, так і As-збагачених As-S стекел та плівок. Компоненти 2 (і 2') можуть бути віднесені до сіркозбагачених S-SAs с.о. і це добре узгоджується з нашими попередніми дослідженнями та теоретичними оцінками [8]. Спектри основного рівня As 3d наночарів $As_{40}S_{60}$ та $As_{50}S_{50}$ (як свіжонапилені, так і опромінені зеленим лазером) розкладаються за допомогою трьох компонент: миш'як, зв'язаний з трьома атомами сірки As-S₃ (1, 1'), миш'як, зв'язаний з двома сірками та одним атомом миш'яку As-S₂As (2, 2'), і миш'як, зв'язаний з однією сіркою та двома атомами миш'яку As-SAs₂ (3, 3'). Ці віднесення базуються на нашому попередньому дослі-

дженні [8] і добре узгоджуються з опублікованими даними [6]. Слід зазначити, що для найкращої розбивки спектрів основних рівнів As 3d наночарів $As_{45}S_{55}$ необхідна четверта компонента. Енергетичне положення цієї компоненти дозволяє інтерпретувати її як миш'як, зв'язаний з трьома іншими атомами миш'яку [6]. Із спектрів

основних рівнів наночарів As_xS_{100-x} ($x = 40, 45, 50$), показаних на рисунку 1, були розраховані концентрація атомів та співвідношення As/S для свіжо-напилених та освітлених зеленим лазерним світлом зразків. Відповідні значення наведені в таблиці 1.

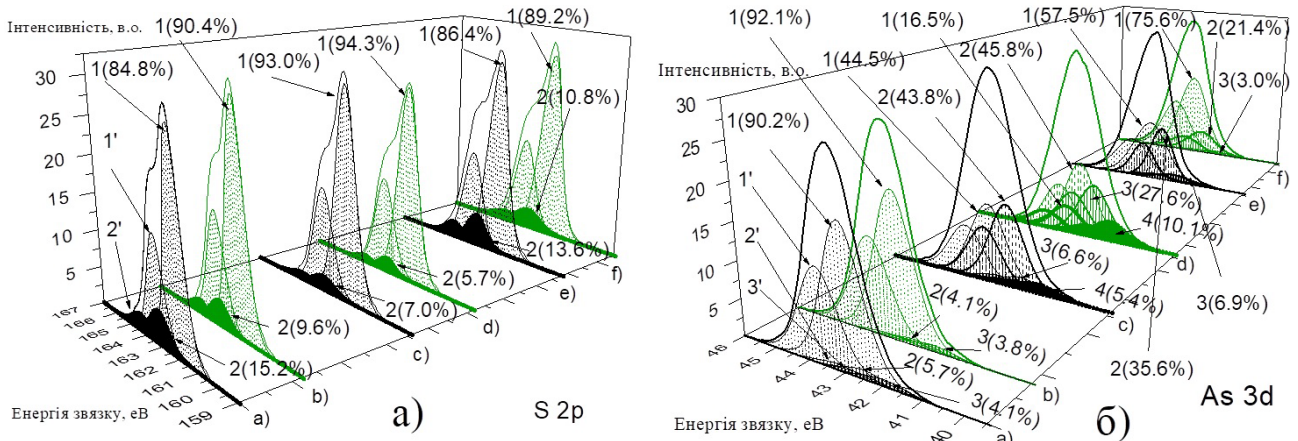


Рисунок 1. S 2p (а) та As 3d (б) розкладені спектри основних рівнів свіжо-напилених (а, с, е) і опроміненних зеленим ($\lambda = 532$ нм) лазером (b, d, f) приповерхневих наночарів тонких плівок $As_{40}S_{60}$ (а, б), $As_{45}S_{55}$ (с, д) та $As_{50}S_{50}$ (е, ф). Для S 2p: 1, 2 позначено $2p_{3/2}$, і 1', 2' позначено $2p_{1/2}$ піки компонентів S-As₂ (1, 1') і S-SAs (2, 2'). Для As 3d: 1, 2, 3, 4 позначено $3d_{5/2}$, та 1', 2', 3', 4' позначено $3d_{3/2}$ піки компонентів As-S₃ (1, 1'), As-S₂As (2, 2'), As-SAs₂ (3, 3') та As-As₃ (4, 4').

Таблиця 1.

Співвідношення атомів, співвідношення As/S наночарів $As_{40}S_{60}$, $As_{45}S_{55}$ та $As_{50}S_{50}$, розраховані за даними XPS (для порівняння, у дужках дано співвідношення As/S для об'ємних стекл).

Елемент	$As_{40}S_{60}$		$As_{45}S_{55}$		$As_{50}S_{50}$	
	свіжо-напилена	опромінена	свіжо-напилена	Опромінена	свіжо-напилена	опромінена
As, %	42.9	43.0	48.9	51.0	45.4	45.8
S, %	57.1	57.0	51.1	48.9	54.6	54.2
As/S	0.75 (0.67)	0.75	0.96 (0.82)	1.04	0.83 (1)	0.84

Видно, що термічне випаровування халькогенідних стекл композицій $As_{40}S_{60}$ та $As_{45}S_{55}$ приводить до формування миш'якозбагачених плівок, а для композиції $As_{50}S_{50}$ – навпаки. Лазерне опромінення приводить до подальшого зростання процентного вмісту As у приповерхневих шарах плівок. При цьому, всі склади демонструють наявність гомополярних As-As і S-S зав'язків. Попередні дослідження парів стекл в процесі напилення плівок різних композицій [10] показали наявність таких

кластерів з гомополярними зв'язками в парах в процесі випаровування, чим і пояснюється їх наявність в плівках. Саме наявність «заморожування» гомополярних зв'язків і є причиною фоточутливості матеріалів на основі As-S.

Для вивчення структури поверхні плівок були отримані знімки зразків As_xS_{100-x} ($x = 40, 45, 50$), свіжо-напилених, відпалених та освітлених лазером. Результати таких досліджень приведені на рис. 2.

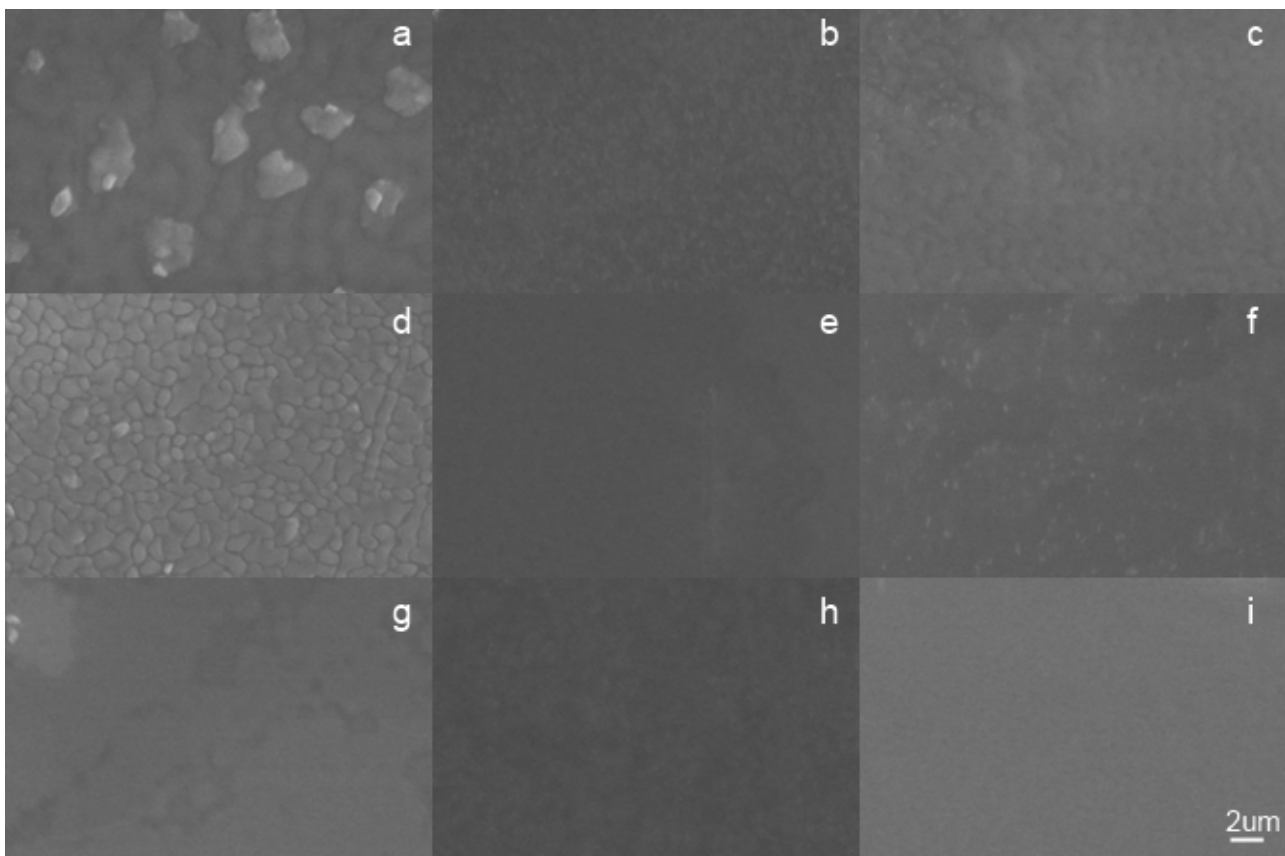


Рисунок 2. СЕМ зображення свіжонапишених (a, d, g), відпалених (b, e, h) і опромінених лазером (c, f, i) плівок $As_{40}S_{60}$ (a, b, c), $As_{45}S_{55}$ (d, e, f) та $As_{50}S_{50}$ (g, h, i).

Видно, що структура свіжонапишених плівок $As_{40}Se_{60}$ є зернистою. Термовідпал приводить до суттєвого впорядкування геометрії поверхні – структура стає майже гладкою і це явище добре узгоджується з описаним в літературі явищем впорядкування структури плівок під дією температури. Лазерний відпал частково стимулює процес сепарування фаз – поверхня плівки стає структурованою. Найбільш зернистою є поверхня плівки $As_{45}S_{55}$. Це чітко підтверджує результати, описані Майсселом і Гленгом, про острівковий характер росту плівок. Однак, подальша обробка (відпал, освітлення лазером) викликає упорядкування структури. Композиція $As_{50}S_{50}$ більш однорідна і обробка не змінює суттєво структуру, як у двох інших композиціях.

Висновки

Досліджено локальну та молекулярну структуру поверхневих шарів тонких плівок As_xS_{100-x} ($x = 40, 45, 50$) та їх перетворення, індуковані когерентним лазерним опроміненням з енергією, близькою до

енергії ширини забороненої зони, з використанням РФС та СЕМ.

Виявлена істотна відмінність поверхневої стехіометрії аморфних плівок As-S та складу відповідних стекол, і встановлено, що це пов'язано з особливостями молекулярної складової газової фази в процесі «загартування» на непідігрітій підкладинці, що свідчить про те, що склад парової фази грає вирішальну роль у створенні композиції плівки. Лазерне опромінення зменшує концентрацію гомополярних зв'язків S-S у структурі всіх наночарів As_xS_{100-x} ($x = 40, 45, 50$). Проте зменшення концентрації гомополярних зв'язків As-As при лазерному освітленні спостерігалось лише в структурі плівок $As_{40}S_{60}$ та $As_{50}S_{50}$. Виявлено суттєвий вклад с.о. As-S₂As та As-SAs₂ та поява As-збагаченої As-As₃ с.о. в структурі тонкої плівки $As_{45}S_{55}$ при лазерному освітленні. СЕМ фотографії поверхні плівок підтверджують впорядкування структури плівок при вторинній обробці.

Робота виконана в рамках проекту ДБ-843 МОН України. Публікація містить

результати досліджень, проведених при грантовій підтримці Держаного фонду фундаментальних досліджень за конкурсним проектом 0117U006384.

Подяки

О.К., Р.Г. і В.М. висловлюють подяку Угорській академії наук за підтримку в рамках програми "Domus Hungarica Scientiarum et Artium Programme".

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Mott NF, Davis EA. Electronic processes in non-crystalline materials. - London, England: Oxford Univ. Press; 1971. – 448 p.
2. Tanaka K, and Ohtsuka Y. Composition dependence of photo-induced refractive index changes in amorphous AsS films // Thin Solid Films. – 1979. – V.57. – P. 59-64.
3. Elliott SR. A unified model for reversible photostructural effects in chalcogenide glasses // J. Non-Cryst. Solids. - 1986. – V.81. – P. 71-98.
4. Mitsa V, Holomb R, Veres M, Marton A, Rosola I, Fekeshgazi I and Koós M. Non-linear optical properties and structure of wide band gap non-crystalline semiconductors // Phys. Status Solidi C. – 2011. – V.9. – P. 2696-2670.
5. Kondrat O., Holomb R., Csik A., Takats V., Veres M., Mitsa V. Coherent light photo-modification, mass transport effect and surface relief formation in As_xS_{100-x} nanolayers: absorption edge, XPS and Raman spectroscopy combined with profilometry study // Nanoscale Research Letters. – 2017. – V.12. – P. 149-158.
6. Wanger CD, Riggs WM, Davis LE, Moulder JF, Muilenberg GE. Handbook of x-ray photoelectron spectroscopy. - Minnesota, USA: Perkin-Elmer Corp., Physical Electronics Division, Eden Prairie, 1979. – 190 p.
7. Choi Duk-Yong, Madden Steve, Rode Andrei, Wang Rongping and Luther-Davies Barry. Nanoscale phase separation in ultrafast pulsed laser deposited arsenic trisulfide (As_2S_3) films and its effect on plasma etching // J. Appl. Phys. – 2007. – V.102. – P. 083532-5.
8. Kondrat O, Holomb R, Popovich N, Mitsa V, Veres M, Csik A, Tsud N, Matolín V and Prince K.C. Local surface structure and structural properties of As-Se nanolayers studied by synchrotron radiation photoelectron spectroscopy and DFT calculations // J. Non-Cryst. Solids. – 2015. – V.410. – P. 180–185.
9. Petkov K, Krastev V and Marinova Ts. XPS study of amorphous As_2S_3 films deposited onto chromium layers // Surf. Interface Anal. – 1994. – V.22. – P.202-205.
10. White Koto, Kumar Binod, Rai Amarendra. Effect of deposition rate on structure and properties of As_2S_3 film // Thin Solid Films. – 1988. – V.161. – P. 139–147.

Стаття надійшла до редакції 5.04.2017

А.Б. Кондрат¹, Р.М. Голомб¹, А. Чик², В. Токач², М. Вереш³, Н. Цуд⁴,
В.М.Мица¹

¹Ужгородський національний університет, 88000, Ужгород, ул. Волошина, 54

e-mail: oleksandr.kondrat@uzhnu.edu.ua

²Інститут ядерних досліджень Венгерської академії наук, Н-4001 Дебрецен, Венгрія

³Вігнерівський центр фізических досліджень Венгерської академії наук, 1121 Будапешт, Венгрія

⁴Карловий університет, факультет математики і фізики, кафедра науки поверхності і плазми, 18000 Прага 8, Чехія

СТРУКТУРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ НАНОСЛОЕВ As_xS_{100-x} : РЕНГЕНФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОННОМИКРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и сканирующей электронной микроскопии изучена структура приповерхностных нанослоев тонких пленок As_xS_{100-x} ($x = 40, 45, 50$) и ее трансформация под действием когерентного зеленого (532 нм) лазерного облучения. Показано, что состав полученных пленок зависит не только от состава исходного материала, но также от состава пары в процессе испарения. Лазерное излучение с энергией, близкой к энергии ширины запрещенной зоны, снижает количество гомополярных связей As-As и S-S в пленках, полученных термическим испарением стекол $As_{40}S_{60}$ и $As_{50}S_{50}$. Композиция $As_{45}S_{55}$ демонстрирует увеличение количества связей As-As, несмотря на частичное уменьшение связей S-S. Наблюдаемый эффект имеет место из-за наличия структурных единиц As_4S_3 . Для изучения структуры поверхности пленок были получены СЭМ снимки образцов As_xS_{100-x} ($x = 40, 45, 50$), свеженапыленных, отожженных и облученных лазером.

Ключевые слова: рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, аморфная пленка, лазерное облучение, сканирующая электронная микроскопия, структурные единицы.

PACS 68.55.-a, 78.30.Ly, 79.60.-i

DOI: 10.24144/2415-8038.2017.41.33-40

O.B. Kondrat¹, R.M. Holomb¹, A. Csik², V. Takáts², M. Veres³, N. Tsud⁴
V.M. Mitsa¹

¹Uzhhorod National University, 88000, Uzhhorod, Voloshin Str., 54

e-mail: oleksandr.kondrat@uzhnu.edu.ua

²Institute for Nuclear Research, Hungarian Academy of Sciences, H-4001 Debrecen, Hungary

³Wigner Research Centre for Physics, Hungarian Academy of Sciences, 1121 Budapest, Hungary

⁴Charles University, Faculty of Mathematics and Physics, Department of Surface and Plasma Science, V Holešovičkách 2, 18000 Prague 8, Czech Republic

STRUCTURAL TRANSFORMATIONS ON THE As_xS_{100-x} NANOLAYERS: X-RAY PHOTOELECTRON AND ELECTRON MICROSCOPY INVESTIGATIONS

Background: The research of chalcogenide glassy (ChG) materials formed a general understanding of electronic phenomena in disordered structures. The numerous investigations of their fundamental physical and chemical properties have been already studied. Unique structural, electronic and optical properties determined their various applications. Photosensitivity is the main feature of chalcogenide glasses for fabrication phase-change memory, tailoring direct waveguides and grating patterning.

Materials and methods: Amorphous As_xS_{100-x} ($x = 40, 45, 50$) were prepared by thermal vacuum evaporation from appropriate bulk glass powders onto silicon wafers. The surface chemical composition and structure of material were investigated by X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and scanning electron microscopy (SEM) on as-deposited ChG thin film samples and samples being illuminated by near bandgap laser ($\lambda = 532$ nm, photon energy ~ 2.4 eV, $p = 25$ mW), under ambient conditions.

Results: All spectra of S 2p electron core level were fitted by two components: S- As_2 and S-SAs s.u. The As 3d core level spectra of $As_{40}S_{60}$ and $As_{50}S_{50}$ nanolayers contains As-S₃, As-S₂As and As-SAs₂ s.u. $As_{45}S_{55}$ structure is characterized by the presence of the fourth, As-As₃ component apart from previous mentioned three. Near-bandgap laser light illumination of As_xS_{100-x} ($x = 40, 45, 50$) samples causes decreasing of the contribution of components with the homopolar S-S bonds in all samples, decreasing of components with homopolar As-As bonds in the structure of $As_{40}S_{60}$ and $As_{50}S_{50}$ nanolayers and increasing of concentration of components with As-As bonds in $As_{45}S_{55}$ films.

Conclusion: The local and molecular structure of the surface layers of As_xS_{100-x} thin films ($x = 40, 45, 50$) and their structural transformations induced by coherent laser irradiation with energy close to band gap energy, with using XPS and SEM were investigated. An essential difference between the surface stoichiometry and the composition of the appropriate glasses has been found. Established that this behavior caused by peculiarities of the molecular component of the gas phase during deposition. This indicates that the type of molecules in a pair plays a decisive role in forming composition of the film. Laser irradiation reduces the concentration of homopolar S-S bonds in the structure of all As_xS_{100-x} nanolayers ($x = 40, 45, 50$). However a decreasing of the As-As homopolar bond concentration induced by laser light was observed only on samples of $As_{40}S_{60}$ and $As_{50}S_{50}$ films. During illumination significant contribution of As-S₂As and As-SAs₂ s.u. and the appearance of As-enriched As-As₃ s.u. was seen in the case of $As_{45}S_{55}$ thin film sample. SEM photos of the surface of the films confirm the ordering of the structure of the films during processing.

Keywords: X-ray photoelectron spectroscopy, amorphous film, laser irradiation, scanning electron microscopy, structural units.

PACS NUMBER: 68.55.-a, 78.30.Ly, 79.60.-i

REFERENCES

1. Mott, NF, Davis, EA. (1971), *Electronic processes in non-crystalline materials.* - London, England: Oxford Univ. Press, 448 p.
2. Tanaka, K, and Ohtsuka, Y. (1979), "Composition dependence of photo-induced refractive index changes in amorphous AsS films", *Thin Solid Films*, V.57, pp. 59-64.
3. Elliott, SR. (1986), "A unified model for reversible photostructural effects in chalcogenide glasses", *J. Non-Cryst. Solids*, V.81, pp. 71-98.
4. Mitsa, V, Holomb, R, Veres, M, Marton, A, Rosola, I, Fekeshgazi, I and Koós, M. (2011), "Non-linear optical properties and structure of wide band gap non-crystalline semiconductors", *Phys. Status Solidi C*, V.9, pp. 2696-2670.
5. Kondrat, O., Holomb, R., Csik, A., Takats, V., Veres, M., Mitsa, V. (2017), "Coherent light photo-modification, mass transport effect and surface relief formation in As_xS_{100-x} nanolayers: absorption edge, XPS and Raman spectroscopy combined with profilometry study", *Nanoscale Research Letters*, V.12, pp. 149-158.
6. Wanger, CD, Riggs, WM, Davis, LE, Moulder, JF, Muilenberg, GE. (1979), *Handbook of x-ray photoelectron spectroscopy.* - Minnesota, USA: Perkin-Elmer Corp., Physical Electronics Division, Eden Prairie, 190 p.
7. Choi, Duk-Yong, Madden, Steve, Rode, Andrei, Wang, Rongping and Luther-Davies, Barry. (2007), "Nanoscale phase separation in ultrafast pulsed laser deposited arsenic trisulfide (As_2S_3) films and its effect on plasma etching", *J. Appl. Phys.*, V.102, pp. 083532-5.
8. Kondrat, O., Holomb, R., Popovich, N., Mitsa, V., Veres, M., Csik, A., Tsud, N., Matolín, V. and Prince, K.C. (2015), "Local surface structure and structural properties of As-Se nanolayers studied by synchrotron radiation photoelectron spectroscopy and DFT calculations", *J. Non-Cryst. Solids*, V.410, pp. 180–185.
9. Petkov, K, Krastev, V and Marinova, Ts. (1994), "XPS study of amorphous As_2S_3 films deposited onto chromium layers" *Surf. Interface Anal.*, V.22, pp. 202-205.
10. White, Koto, Kumar, Binod, Rai, Amarendra. (1988), "Effect of deposition rate on structure and properties of As_2S_3 film", *Thin Solid Films*, V.161, pp. 139–147.