

УДК 539.21:537.1

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

DOI: 10.24144/2415-8038.2016.40.54-61

О.Б.Кондрат<sup>1</sup>, Р.М.Голомб<sup>1</sup>, А.Чік<sup>2</sup>, В.Токач<sup>2</sup>, М.Вереш<sup>3</sup>, В.М.Міца<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ужгородський національний університет, 88000, Ужгород, вул. Волошина, 54

e-mail: [o.b.kondrat@gmail.com](mailto:o.b.kondrat@gmail.com)

<sup>2</sup>Інститут ядерних досліджень Угорської академії наук, Н-4001 Дебрецен, Угорщина

<sup>3</sup>Вігнерівський центр фізичних досліджень Угорської академії наук, 1121 Будапешт, Угорщина

## СКЛАД ТА ЛОКАЛЬНЕ ОТОЧЕННЯ АТОМІВ В ПЛІВКАХ $As_2Se_3$ ТА ЇХ ЗМІНА ПРИ ДІЇ КОГЕРЕНТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Методами рентгенівської фотоелектронної спектроскопії, Раман- та поверхнево підсиленої Раман-спектроскопії досліджена структура ближнього та середнього порядку приповерхневих наночарів та об'єму тонких плівок  $a-As_2Se_3$  при нормальних умовах та її зміни під дією лазерного опромінення з енергією фотонів, близькою до ширини забороненої зони. Проаналізовані форма і енергетичне положення фотоемісійних піків As 3d та Se 3d аморфних та опромінених лазером плівок  $a-As_2Se_3$ . Виявлені і описані відмінності у інтенсивності компонент піків, стимульовані лазерним опроміненням.

**Ключові слова:** рентгенівська фотоелектронна спектроскопія, Раман-спектроскопія, аморфна плівка, лазерне опромінення, структурні одиниці.

### Вступ

Аморфні халькогеніди - це клас неупорядкованих напівпровідникових матеріалів, одержаних комбінацією елементів халькогену (зазвичай S, Se, Te) з іншим хімічним елементом (як правило, As, Ge, Sb). Вони є перспективними матеріалами для застосування в нано та оптоелектроніці завдяки структурним, електронним та оптичним властивостям у широкому спектральному діапазоні [1] і широко використовуються в якості матеріалів для інфрачервоної (ІЧ) оптики завдяки високій оптичній прозорості. Крім того, у халькогенідних стеклах під дією лазерного випромінювання відбуваються зміни як властивостей, так і структури [2,3].

Для дослідження і опису структури некристалічних халькогенідів на нанорівні використовувалися численні експериментальні методи, зокрема традиційні методи дифракції, непружного та комбінаційного розсіювання (КР) [4]. Крім

того, для інтерпретації експериментальних результатів застосовується моделювання структури, зокрема методами молекулярної динаміки та розрахунками з перших принципів [5]. Так, поєднання результатів експериментальних досліджень спектрів КР з першопринципними розрахунками дало змогу трактувати структуру та фотохімічні перетворення халькогенідних стеклок As-S, Ge-S на атомному рівні [6].

В даній роботі методом рентгенівської фотоелектронної спектроскопії, Раман- та поверхнево підсиленої Раман-спектроскопії досліджено природу фотоіндукованих структурних перетворень аморфних плівок  $As_2Se_3$ , визначено типи і концентрацію різних структурних одиниць у плівці  $As_2Se_3$  до і після опромінення лазером.

### Методика досліджень

Аморфні халькогенідні плівки  $As_2Se_3$  були одержані методом термічного

випаровування об'ємного скла, яке було попередньо одержано методом розплаву суміші високочистих компонент (99.999 %) As та Se у відкачених кварцових ампулах із послідовним загартовуванням розплаву. Виготовлення плівок здійснювалося термічним випаровуванням скла у вакуумі і осадженням на кремнієві підкладинки. Опромінення плівок He-Ne (632.8 нм) лазером з густиною потужності 50 мВт/см<sup>2</sup> здійснювалося на повітрі при кімнатній температурі протягом 3 год. Інтенсивність випромінювання лазера і час експозиції вибиралися, виходячи з результатів попередніх досліджень стекол As-Se методом КР спектроскопії.

Для одержання фотоemisійних спектрів було використано джерело рентгенівського випромінювання Mg K<sub>α</sub> (hν=1253.6 eV). Перед вимірюваннями з метою видалення забруднень поверхня плівок піддавалася короткочасному Ar-іонному бомбардуванню.

Спектри основних рівнів As 3d та Se 3d свіженанилених та опромінених лазером плівок As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> були виміряні із роздільною здатністю 1 eV мультиканальним напівсферичним аналізатором РНОІВОС 150. Під час вимірювань спостерігався ефект зарядки поверхні. Для корекції впливу заряду поверхні значення енергії зв'язку нормувалося на величину, визначену із сигналу C 1s (284.8 eV) та Se 3d<sub>5/2</sub> (54.7 eV) [7]. Інтенсивність одержаних РФ-спектрів основних рівнів As 3d, Se 3d, O 1s, and C 1s нормована на перерізи фотоіонізації відповідних атомів та енергій [8, 9].

Піки основних рівнів Se 3d та As 3d були описані за допомогою функції Войта з врахування фону типу Ширлі. Для піків дуплету 3d<sub>5/2</sub> й 3d<sub>3/2</sub>, утворених внаслідок спин-орбітального розщеплення рівня, відношення інтенсивностей становить 3:2. Розділення піків дуплету складало 0.69 та 0.86 eV для As 3d і Se 3d відповідно.

Спектри КР вимірювалися за допомогою Раман спектрометра Renishaw system 1000. В якості джерела збудження використовувався діодний лазер, що працює на довжині хвилі 785 нм. Спектри були виміряні в конфігурації мікро-

комбінаційного розсіювання. Для отримання поверхневого підсилення перед вимірюваннями на поверхню плівок наносився розчин із наночастинками золота.

### Результати та їх обговорення

Спектри основних рівнів Se 3d та As 3d аморфної неопроміненої (А) та опроміненої лазером (В) плівок a-As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> разом з результатами розбивки на компоненти приведені на рисунку 1 [10]. Їх аналіз показав, що ближній порядок такої плівки сформований As-Se-As (~ 54.7 eV, пік 1) і As-Se-Se (~ 55.2 eV, пік 2) структурними одиницями (с.о.) - по результатам розбивки спектру Se 3d, і 2As-As-Se (~42 eV, пік 1), 2Se-As-As (~42.5 eV, пік 2) і As-3Se (~43.0 eV, пік 3) – із аналізу спектру As 3d. Енергетичне положення виявлених компонент добре корелює з літературними даними [11].

Аналіз спектру Se 3d показує, що приповерхневі наночастиці неопроміненої плівки As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> побудовані із стехіометричних с.о. As-Se-As (93 %) і 7 % Se-Se-As, що свідчить про наявність у структурі плівки також с.о. з гомополярними Se-Se зв'язками. У спектрі As 3d цієї ж плівки основною (51 %) компонентою є пік, що характеризується стехіометричними с.о. As-3Se. Також має місце значний (37 %) вміст замкнутих молекул As<sub>4</sub>Se<sub>4</sub>, які складаються виключно із с.о. 2Se-As-As, і 19 % с.о. Se-As-2As [10]. Лазерне опромінення плівки a-As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> призвело до зростання кількості Se-збагачених с.о. As-Se-Se (від 7 % для неопроміненого до 27 % для опроміненого зразка), зникнення компоненти Se-As-2As, зменшення вмісту молекул As<sub>4</sub>Se<sub>4</sub> (пік 2) і при цьому суттєвого зростання кількості стехіометричних As-3Se с.о., що корелює із збільшенням кількості As-Se-Se с.о. у спектрі Se 3d. Аналогічні явища описані нами у [12] для плівок As<sub>50</sub>Se<sub>50</sub>. У роботі [10] відмічається, що лазерне опромінення плівок a-As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> на повітрі стимулює дифузійні процеси: з одного боку атоми As дифундують з глибших шарів до поверхні через механізм розриву зв'язків для

зменшення градієнту концентрації миш'яку, який виник при контакті з повітрям. При цьому відбувається подальше окислення As і ревіпарування

As-O з поверхні, що призводить до подальшого зменшення вмісту миш'яку в приповерхневих шарах плівки.

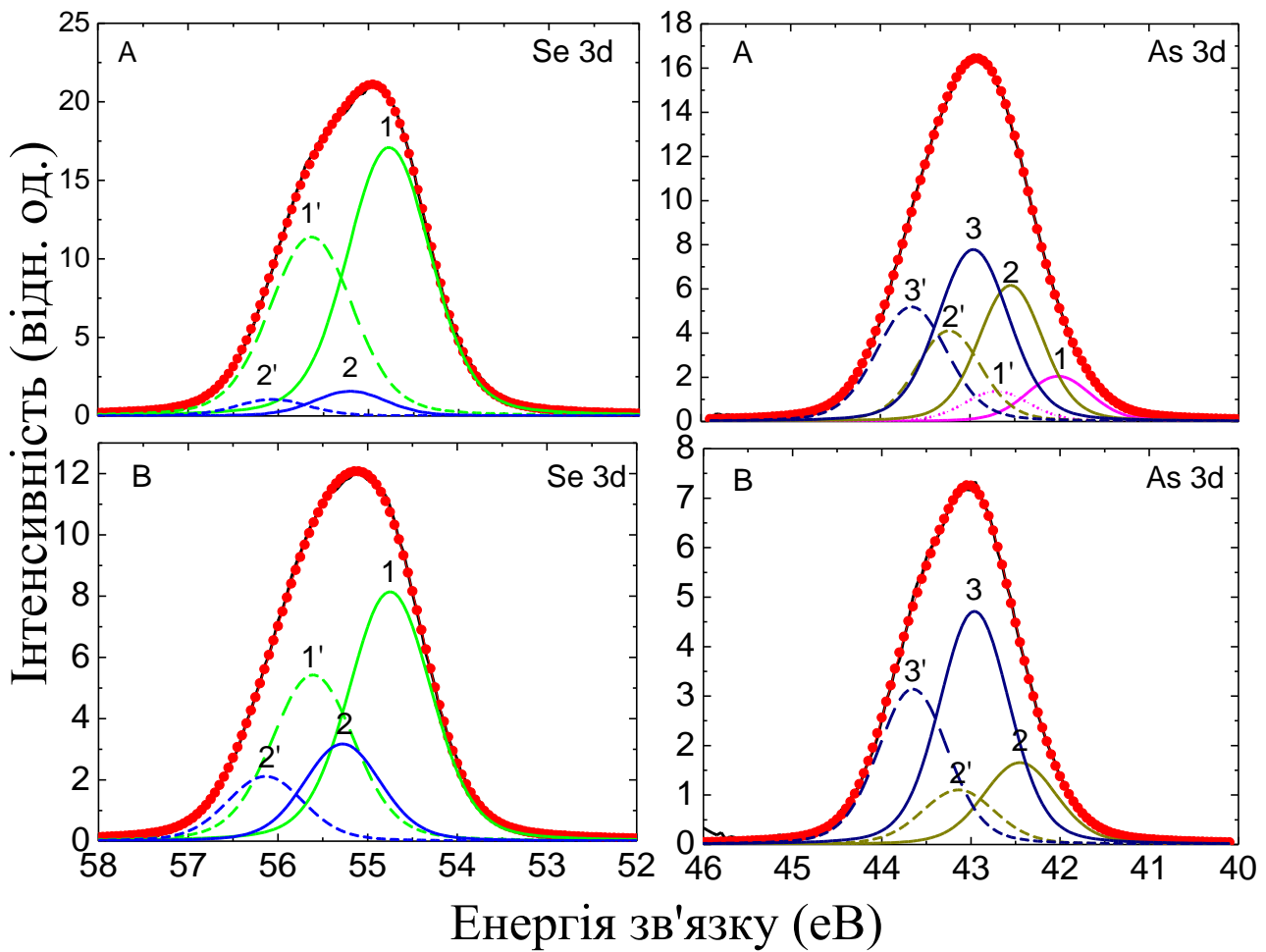


Рисунок 1. Спектри основних рівнів (червоні кружечки) Se 3d і As 3d та результати розбивки на компоненти (чорна суцільна лінія) аморфної (A) та опроміненої лазером (B) плівок  $As_2Se_3$ . Компоненти піку Se 3d: As-Se-As (1), As-Se-Se (2); компоненти піку As 3d: Se-As-2As (1), 2Se-As-As (2), As-3Se (3). Суцільні та штрихові лінії позначають відповідно  $3d_{5/2}$  й  $3d_{3/2}$  піки [10].

Для проведення комплексного аналізу структури плівок  $As_2Se_3$  і впливу когерентного випромінювання на структурне реаранжування, було досліджено Раман-спектри і поверхнево підсилені Раман-спектри (ППРС) досліджуваних зразків. Результати таких досліджень приведені на рис 2.

Слід зауважити, що на відміну від рентгенівської фотоелектронної спектроскопії, яка дає можливість

аналізувати декілька приповерхневих моношарів, Раман-спектроскопія дає інформацію про структуру всієї товщини плівки. При поверхневому підсиленні Раман-спектроскопія стає значно чутливіша до структури поверхні досліджуваного матеріалу, що дозволяє доповнити результати рентгенофотоелектронної спектроскопії. Із рис.2, RA

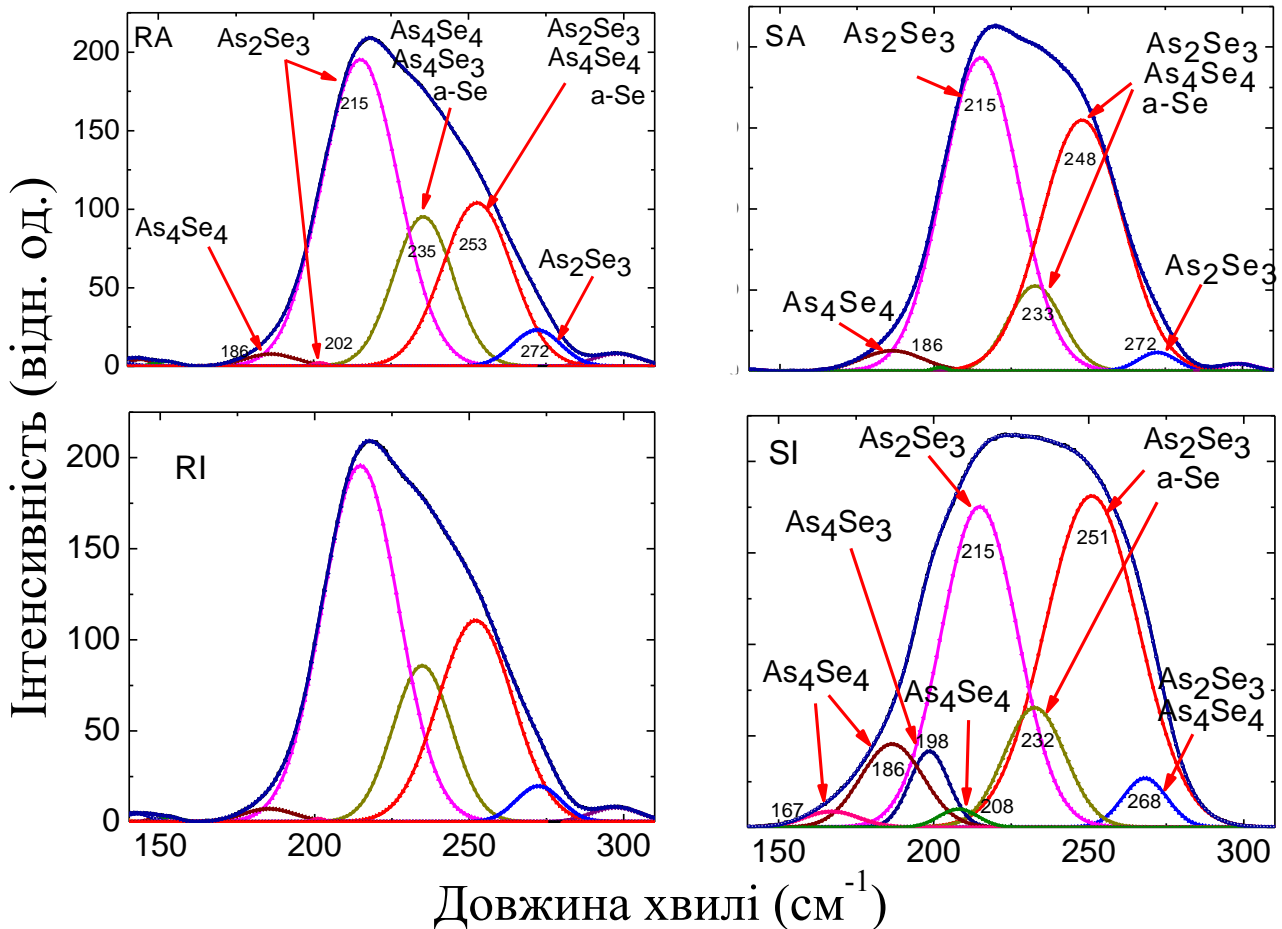


Рисунок 2. Раман спектри (RA, RI) і поверхнево підсилені Раман спектри (SA, SI) аморфної (RA, SA) і опроміненої лазером (RI, SI) плівок  $\text{As}_2\text{Se}_3$ . Інтерпретація компонент зроблена на основі [13].

видно, що структура аморфної плівки  $\text{As}_2\text{Se}_3$  сформована в більшості фрагментами структури кристалічного  $\text{As}_2\text{Se}_3$ , але при цьому спостерігається деяка кількість молекул  $\text{As}_4\text{Se}_4$  і вільного селену. Слід зауважити, що по результатам рентгенофотоелектронних досліджень, на поверхні аморфних плівок вільний селен не був виявлений, що вказує на відмінність між структурою об'єму і поверхні плівок. Порівняння спектрів RA і SA вказує на зменшення вкладу вільного селену і незначного зростання вкладу молекул  $\text{As}_4\text{Se}_4$ . Беручи до уваги відсутність вільного селену на рис.1, можна припустити також залишковий вплив об'єму при ППРС дослідженнях, хоча зменшення вкладу Se компоненти підтверджує відмінність між структурою поверхні і об'єму плівки. Виявлено, що на

відміну від поверхнево-підсилені Раман спектрів аморфної та опроміненої плівок  $\text{As}_2\text{Se}_3$  (SA SI, відповідно), спектри RA та RI плівок є дуже подібними. Це свідчить про те що лазерне випромінювання з енергією фотонів близькою до забороненої зони матеріалу інтенсивно поглинається речовиною на приповерхневих шарах, активуючи при цьому найбільшу кількість фото-структурних трансформацій в цих областях. Навпаки, в глибших шарах плівок інтенсивність лазерного випромінювання різко зменшується ( $I \sim e^{-\alpha d}$ , де  $d$ -товщина шару) і значних трансформацій структури в цих областях не спостерігається.

Таким чином, найбільш суттєва відмінність спостерігається в поверхнево підсилені Раман спектрах аморфної і неопроміненої плівок  $\text{As}_2\text{Se}_3$  (SA та SI). Як видно з рис.2, що при лазерному опроміненні плівки має місце приріст

компоненти, яка свідчить про наявність Se-Se зв'язків в матриці структури, і зсув піку при  $245\text{ см}^{-1}$  до положення  $251\text{ см}^{-1}$ , що характеризує збільшення вкладу пірамідальних структур, типових для  $\text{As}_2\text{Se}_3$ . Такі результати повністю узгоджуються із результатами рентгенофотоелектронних досліджень.

### Висновки

Методом рентгенівської фотоелектронної спектроскопії, Раман- та поверхнево підсиленої Раман-спектроскопії здійснена характеристика структури плівок  $\text{As}_2\text{Se}_3$  а також індуковані лазерним опроміненням з енергією фотонів, близькою до ширини забороненої зони, локальні структурні зміни у приповерхневих нанощарах плівок.

В результаті аналізу встановлено, що:

1) внаслідок технологічних особливостей процесу напилення плівок і процесів окисації поверхні плівки в нормальних умовах склад поверхні плівки збагачений селеном в порівнянні з композицією вихідного скла;

2) лазерне опромінення плівок  $\text{As}_2\text{Se}_3$  призводить до перерозподілу інтенсивностей компонент в фотоелектронних As 3d S 2p спектрах що пов'язано з руйнуванням 2As-As-Se с.о. та одночасним утворенням додаткових Se-Se-As і As-3Se с.о. Тобто в результаті лазерного опромінення відбувається формування додаткових Se-Se зв'язків і зменшення кількості As-As зв'язків;

3) трансформація поверхнево підсилених Раман спектрів опромінених плівок  $\text{As}_2\text{Se}_3$  узгоджується з результатами рентгенівської фотоелектронної спектроскопії та вказує на зростання інтенсивності смуг при  $232$  і  $251\text{ см}^{-1}$ , характерних для спектрів нанокластерів, побудованих на основі аморфного селену та кристалічного трисульфиду миш'яку, відповідно.

### Подяки

О.К. і Р.Г. висловлюють глибоку вдячність за підтримку з боку Угорської академії наук в рамках Domus Hungarica Scientiarum et Artium Programme

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Kolobov A.V., Tominaga J. Chalcogenide glasses as prospective materials for optical memories and optical data storage // J. Mater. Sci.: Mater. Electron. – 2003. – V.14. – P. 677-680.
2. Shimakawa K., Kolobov A., Elliott S.R. Photoinduced effects and metastability in amorphous semiconductors and insulators // Adv. Phys. – 1995. – V.44. – P. 475-488.
3. Tanaka K. Photoinduced structural changes in chalcogenide glasses // Rev. Solid. St. Sci. – 1990. - V.4. - P. 641-659.
4. Holomb R., Mitsa V., Johansson P., Veres M. Boson peak in low-frequency Raman spectra of  $\text{As}_x\text{S}_{100-x}$  glasses: nanocluster contribution // Phys. Status Solidi C. – 2000. - V.7. - №3–4. - P. 885-888.
5. Kondrat O., Popovich N., Holomb R., Mitsa V., Petrachenkov O., Koós M., Veres M. Ab initio calculations and the effect of atomic substitution in the Raman spectra of  $\text{As}(\text{Sb},\text{Bi})_2\text{S}_3$  films // Phys. Status Solidi C. – 2010. – V.7. - №3–4. – P. 893-896.
6. Holomb R., Veres M., Mitsa V. Ring-, branchy-, and cage-like  $\text{As}_n\text{S}_m$  nanoclusters in the structure of amorphous semiconductors: ab initio and Raman study // Journ. of Optoelect. and Adv. Mat. – 2009. – V.11. - №7. – P. 917-923.
7. Briggs D., Seah M.P. Practical surface analysis. - vol.1. – New York: John WILEY & SONS, 2nd edition, 1993. – 330 p.
8. Yeh J.J. Atomic Calculation of Photoionization Cross-Sections and Asymmetry Parameters. – Langhorne:

Gordon and Breach Science Publishers, 1993. – 223 p.

9. Yeh J.J., Lindau I. Atomic Data and Nuclear Data Tables. – 1985. – V.32. – P. 1-155.
10. Кондрат О., Попович Н., Голомб Р., Петраченко О., Лямаєв В., Цуд Н., Міца В. Процеси самоорганізації в тонкоплівкових  $As_{40}Se_{60}$  наночастиках при нормальних умовах та при дії лазерного опромінення // Фізика і Хімія Твердого Тіла. – 2013. - Т.14. - №4. - С. 800-804.
11. Wanger C.D., Riggs W.M., Davis L.E., Moulder J.F., Muilenberg G.E. Handbook of X-ray Photoelectron Spectroscopy. - Minnesota, USA: Perkin-Elmer Corp., Physical Electronics Division, Eden Prairie, 1979. – 190 p.
12. Кондрат О., Попович Н., Голомб Р., Петраченко О., Лямаєв В., Цуд Н., Міца В. Рентгенофотоелектронні дослідження лазерно-індукованих структурних змін у наночастиках  $As_{50}Se_{50}$  // Фізика і Хімія Твердого Тіла. – 2012. - Т.13. - № 1. - С. 77-83.
13. Chen Ping, Boolchand P. and Georgiev D.G. Long term aging of selenide glasses: evidence of sub-Tg endotherms and pre-Tg exotherms // J. Phys.: Condens. Matter. – 2010. - V.22. – N.6. - P. 065104.

О.Б.Кондрат<sup>1</sup>, Р.М.Голомб<sup>1</sup>, А.Чик<sup>2</sup>, В.Токач<sup>2</sup>, М.Вереш<sup>3</sup>, В.М.Мица<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ужгородський національний університет, 88000, Ужгород, ул. Волошина, 54

e-mail: o.b.kondrat@gmail.com

<sup>2</sup>Інститут ядерних досліджень Венгерської академії наук, H-4001 Дебрецен, Венгрія

<sup>3</sup>Вігнерівський центр фізических досліджень Венгерської академії наук, 1121 Будапешт, Венгрія

## СОСТАВ И ЛОКАЛЬНОЕ ОКРУЖЕНИЕ АТОМОВ В ПЛЕНКАХ $As_2Se_3$ И ИХ ИЗМЕНЕНИЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Методами рентгеновської фотоелектронної-, Раман- і поверхностно усиленої Раман-спектроскопії досліджена структура ближнього і середнього порядку приповерхностних нанослоїв і об'єма тонких плінок  $a-As_2Se_3$  при нормальних умовах і її змінення під дією лазерного облучення з енергією фотонів, близької до ширини забороненої зони. Проаналізовані форма і енергетичне положення фотоемісійних піків  $As\ 3d$  і  $Se\ 3d$  аморфних і облучених лазером зразків. Описані стимулировані лазерним облученням структурні трансформації.

**Ключевые слова:** рентгеновська фотоелектронна спектроскопія, Раман-спектроскопія, аморфна плівка, лазерне облучення, структурні одиниці.

О.В.Kondrat<sup>1</sup>, R.M.Holomb<sup>1</sup>, A.Csik<sup>2</sup>, V.Takáts<sup>2</sup>, M.Veresh<sup>3</sup>, V.M.Mitsa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Uzhhorod National University, 88000, Uzhhorod, Voloshin Str., 54

e-mail: o.b.kondrat@gmail.com

<sup>2</sup>Institute for Nuclear Research, Hungarian Academy of Sciences, H-4001 Debrecen, Hungary

<sup>3</sup>Wigner Research Centre for Physics, Hungarian Academy of Sciences, 1121 Budapest, Hungary.

# COMPOSITION AND LOCAL ATOMIC ENVIRONMENT IN $\text{As}_2\text{Se}_3$ FILMS AND THEIR CHANGES UNDER THE COHERENT RADIATION

**Background:** Amorphous chalcogenides is a class of non-crystalline materials obtained by combination of chalcogen (S, Se or Te) elements with other chemical elements demonstrating a large IR transparency and unique electronic and optical properties. Photosensitivity and laser induced processes taking place at the surface of chalcogenide nanolayers increases the functionality of such media and extends their applications to the field of modern nanooptics and nanophotonics.

**Materials and methods:** Amorphous  $\text{As}_2\text{Se}_3$  nanolayers were synthesized by thermal evaporation in a vacuum from target  $\text{As}_2\text{Se}_3$  glasses. Near order structure of the surface nanolayers of the thin amorphous films a- $\text{As}_2\text{Se}_3$  under ambient conditions and its changes under the influence of near bandgap laser illumination, are investigated by X-ray photoelectron spectroscopy, Raman- and surface enhanced Raman spectroscopy.

**Results:** It was established that the structure of the film contains structural units with As-As and Se-Se homopolar bonds apart from the stoichiometric ones. X-ray photoelectron spectroscopy indicate that the laser illumination increases Se-Se bonds and decreases As-As bonds due to the breaking of the As-Se bonds, formation Se-Se and As-O bonds and evaporation the most volatile As-O s.u. Such surface transformations are confirmed by surface enhanced Raman spectroscopy: the additional Se-rich nanoclusters formation at the surface of irradiated As-Se nanolayers is revealed by the increasing in intensity of the peak at  $232\text{ cm}^{-1}$ . The appearance of  $251\text{ cm}^{-1}$  Raman mode in the spectra of irradiated film is interpreted as vibrations of  $\text{As}_2\text{Se}_3$  based nanoclusters.

**Conclusion:** The composition and local structural changes at the surface of  $\text{As}_2\text{S}_3$  nanolayers under near bandgap laser illumination were studied by X-ray photoelectron-, Raman-, and surface-enhanced Raman spectroscopy. Results show that the composition of surface of amorphous As-Se film is slightly enriched by chalcogen in comparison with composition of target  $\text{As}_2\text{Se}_3$  glass. The results of photoelectron spectroscopy show that the near bandgap laser irradiations destroy the 2As-As-Se s.u. and, simultaneously, lead to formation of additional Se-Se-As i As-3Se s.u. at the surface of irradiated films. In contrast with the amorphous  $\text{As}_2\text{Se}_3$  films, the surface-enhanced Raman spectroscopy of irradiated ones reveal the increasing of intensities of  $232$  and  $251\text{ cm}^{-1}$  Raman bands characteristics for vibrations found in nanoclusters based on amorphous Se and crystalline  $\text{As}_2\text{S}_3$  fragments, respectively.

**Keywords:** X-ray photoelectron spectroscopy, Raman spectroscopy, amorphous film, laser irradiation, structural units.

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

## REFERENCES

1. Kolobov, A.V., Tominaga, J. (2003), "Chalcogenide glasses as prospective materials for optical memories and optical data storage", *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, V.14, pp. 677-680.
2. Shimakawa, K., Kolobov, A., Elliott, S.R. (1995), "Photoinduced effects and metastability in amorphous semiconductors and insulators", *Adv. Phys.*, V.44, pp. 475-488.
3. Tanaka, K. (1990), "Photoinduced structural changes in chalcogenide glasses", *Rev. Solid. St. Sci.*, V.4, pp. 641-659.

4. Holomb, R., Mitsa, V., Johansson, P., Veres, M. (2000), "Boson peak in low-frequency Raman spectra of  $As_xS_{100-x}$  glasses: nanocluster contribution", *Phys. Status Solidi C*, V.7, №3–4, pp. 885-888.
5. Kondrat, O., Popovich, N., Holomb, R., Mitsa, V., Petrachenkov, O., Koós, M., Veres, M. (2010), "Ab initio calculations and the effect of atomic substitution in the Raman spectra of  $As(Sb,Bi)_2S_3$  films" *Phys. Status Solidi C*, V.7, №3–4, pp. 893-896.
6. Holomb, R., Veres, M., Mitsa, V. (2009), "Ring-, branchy-, and cage-like  $As_nS_m$  nanoclusters in the structure of amorphous semiconductors: ab initio and Raman study", *Journ. of Optoelect. and Adv. Mat.*, V.11, №7, pp. 917-923.
7. Briggs, D., Seah, M.P. (1993), *Practical surface analysis*, vol.1, John WILEY & SONS, 2nd edition, New York, 330 p.
8. Yeh, J.J. (1993), *Atomic Calculation of Photoionization Cross-Sections and Asymmetry Parameters*, Gordon and Breach Science Publishers, Langhorne, 223 p.
9. Yeh, J.J., Lindau, I. (1985), *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, V.32, pp. 1-155.
10. Kondrat, O., Popovich, N., Holomb, R., Petrachenkov, O., Lyamajev, V., Tsud, N., Mitsa, V. (2013), "Self-organization processes in  $As_{40}Se_{60}$  thin film nanolayers stored under ambient conditions and under laser irradiation" [*"Procesu samoorganizacii v tonkoplivkovykh  $As_{40}Se_{60}$  nanosharakh pry normalnykh umovakh ta pry dii lazernogo oprominennya"*], *Physics and Chemistry of Solid State*, V.14, №4, pp. 800-804.
11. Wanger, C.D., Riggs, W.M., Davis, L.E., Moulder, J.F., Muilenberg, G.E. (1979), *Handbook of X-ray Photoelectron Spectroscopy*, Perkin-Elmer Corp., Physical Electronics Division, Eden Prairie, Minnesota, USA, 190 p.
12. Kondrat, O., Popovich, N., Holomb, R., Petrachenkov, O., Lyamajev, V., Tsud, N., Mitsa, V. (2012), "XPS Investigation of Laser-Induced Structural Changes in Nanolayers  $As_{50}Se_{50}$ " [*"Renthenofotoelektronni doslidzhennya lazerno-indukovanukh strukturnykh zmin u nanosharakh  $As_{50}Se_{50}$ "*] *Physics and Chemistry of Solid State*, V.13, №1, pp. 77-83.
13. Chen, Ping, Boolchand, P. and Georgiev, D.G. (2010), "Long term aging of selenide glasses: evidence of sub-Tg endotherms and pre-Tg exotherms", *J. Phys.: Condens. Matter.*, V.22, N.6, p. 065104.

Стаття надійшла до редакції 25.10.16