

УДК539.21:537.1

Н. І. Попович

Ужгородський національний університет, 88000, Ужгород, вул. Волошина, 54
e-mail: moshenec1972@ukr.net

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ФОТОЕЛЕКТРОННОЇ СПЕКТРОСКОПІЇ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ПРИПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ НЕКРИСТАЛІЧНИХ ХАЛЬКОГЕНІДНИХ МАТЕРІАЛІВ

Проаналізовано можливість застосування методів рентгенівської фотоелектронної спектроскопії та фотоелектронної спектроскопії із використанням синхротронного випромінювання для дослідження структури некристалічних напівпровідникових матеріалів, зокрема халькогенідних. Виявлено переваги і недоліки цих методів у випадку дослідження тонких шарів або поверхні халькогенідних стекел.

Ключові слова: рентгенівська фотоелектронна спектроскопія (XPS), фотоелектронна спектроскопія з використанням синхротронного випромінювання (SRPES), некристалічні халькогеніди, структурні одиниці.

Вступ

Халькогенідні склоподібні напівпровідники (ХСН), відкриті Н. А. Горюновою і Б. Т. Коломійцем в 1955 році [1], займають особливе місце серед неупорядкованих напівпровідників, оскільки їх дослідження лежать в основі створення загальних уявлень про електронні явища у неупорядкованих структурах [2,3]. Значний інтерес до аморфних халькогенідів зумовлений широким діапазоном можливих застосувань цих матеріалів завдяки їх гнучким структурним, електронним та оптичним властивостям [4]. Для дослідження та характеристики структури некристалічних матеріалів, зокрема халькогенідних, застосовувалися різні експериментальні методи, в тому числі традиційні методи дифракції нейтронів та комбінаційного розсіювання світла [5]. Також для інтерпретації експериментальних результатів застосовується структурне моделювання, наприклад, наближення молекулярної

динаміки (МД) і першопринципні розрахунки [6,7].

Для новітніх нелінійних оптичних пристроїв на основі ХСН втрати при поширенні в хвилеводі є важливим чинником визначення можливостей їх практичного застосування [8]. Поглинання на гомополярних і обірваних зв'язках та окислення поверхні збільшують втрати світла у плівках ХСН [8,9]. Тому важливо здійснювати характеристизацію поверхні плівок ХСН, одержаних різними методами.

До експериментальних методів дослідження поверхні відносяться спектроскопічні методи, при яких поверхня бомбардується частинками і/або випромінює їх. За допомогою спектроскопічних методів можна отримати відомості про хімічний склад та структуру поверхні, розподіл заповнених і незаповнених енергетичних поверхневих рівнів, ступінь окислення поверхневих шарів та хімічну активність поверхні або приповерхневих молекул. Глибина аналізу залежить від конкретного методу і змінюється від 10^{-10} до 10^{-6} м.

У наш час широко застосовується електронна спектроскопія, яка базується на аналізі електронів, розсіяних або емітованих поверхнею твердого тіла [10,11]. Тут реалізуються три основних підходи:

1) застосування рентгенівських променів для збудження електронів внутрішніх оболонок, або метод рентгенівської фотоелектронної спектроскопії (РФС);

2) застосування ультрафіолетового випромінювання, що дає змогу дослідити валентні рівні, або ультрафіолетова електронна спектроскопія (УФС);

3) дослідження оже-електронів або електронна оже-спектроскопія (ЕОС).

Особливої уваги заслуговує метод фотоелектронної спектроскопії із застосуванням синхротронного випромінювання, який дає змогу здійснювати аналіз поверхневих шарів досліджуваного матеріалу товщиною від кількох до кількох десятків нанометрів.

У даній роботі здійснено аналіз можливостей застосування рентгенівської фотоелектронної спектроскопії та фотоелектронної спектроскопії із використанням синхротронного випромінювання для дослідження особливостей структури та електронних властивостей поверхні некристалічних хількогенідних тонких плівок.

Особливості методів фотоелектронної спектроскопії

При опроміненні поверхні фотонами баланс енергії у спрощеному вигляді може бути записаний так:

$$E_{kin} = h\nu - \epsilon_{ze}, \quad (1)$$

де E_{kin} – кінетична енергія електронів, що вилітають з молекули під дією фотона з енергією $h\nu$, ϵ_{ze} – енергія зв'язку електрона. Знаючи енергію первинного випромінювання $h\nu$ і визначаючи експериментально кінетичну енергію емітованих електронів, можна знайти енергію зв'язку електрона в атомі.

При опроміненні поверхні речовини фотонами можуть відбуватися різноманітні процеси, в тому числі утворення фотоелектронів, розсіяння фотонів, фотодесорбція атомів і молекул з поверхні (рис. 1).

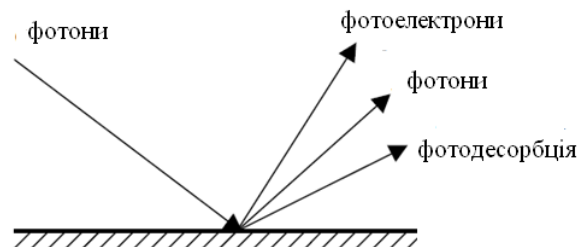


Рис. 1. Процеси на поверхні при опроміненні її фотонами [12]

Суть методу **рентгенівської фотоелектронної спектроскопії (РФС)** полягає в одержанні фотоелектронних спектрів, тобто у вимірюванні кінетичної енергії електрона, вибитого квантом рентгенівського випромінювання з відомою енергією $h\nu$. Внаслідок поглинання фотона зв'язаний електрон переходить у вільний стан і вилітає за межі зразка з енергією, яка в ідеальному випадку повинна задовольняти рівнянню Ейнштейна (1). Однак на практиці при роботі з твердими зразками необхідно ще враховувати роботу виходу спектрометра ϕ_s , тому рівняння (1) набуде вигляду

$$E_{kin} = h\nu - \epsilon_{ze} + \phi_s. \quad (2)$$

Користуючись цим співвідношенням, можна визначити енергію зв'язку електрона на тому чи іншому рівні атома. Для кожного елемента періодичної системи Менделєєва характерна своя будова атома, тому за спектрами фотоелектронів можна здійснювати аналіз компонентного складу поверхні зразка.

РФС характеризує поверхневий шар речовини на глибину ~ 10 нм (до 30 нм для напівпровідникових матеріалів). Глибина аналізу визначається довжиною вільного пробігу електронів відносно непружних зіткнень. У фотоелектронному спектрометрі монохроматичний пучок рентгенівських променів з відомою

енергією фотонів потрапляє на досліджувану поверхню, атом якої поглинає фотон і вилітає з поверхні. Фотоелектрони вилітають з усіх рівнів атома, для яких робота виходу менша, ніж енергія фотона $h\nu$.

Джерелом випромінювання є рентгенівська трубка, яка генерує рентгенівське випромінювання, що включає гальмівне та характеристичне випромінювання (рис. 2). При РФС дослідженнях застосовують, як правило, $K\alpha$ - рентгенівське випромінювання алюмінію або магнію, що дає найвужчі лінії. Для поглинання гальмівного випромінювання рентгенівські промені направляються на зразок через алюмінієвий або магнієвий екран. Застосовують також додаткову монохромацію випромінювання, яка дозволяє зменшити напівширину лінії до 0.2 eV.

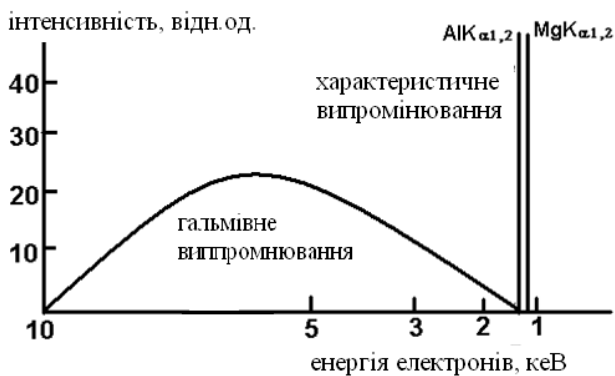


Рис. 2. Спектральний розподіл інтенсивності випромінювання рентгенівської трубки (алюмінієвий або магнієвий анод при 10 кВ) [12]

Для того, щоб аналізатор фіксував більшу кількість вилітаючих електронів, досліджуваний зразок повинен міститися на малій відстані від оптичної системи аналізатора. Аналіз хімічного складу поверхні зразка здійснюється за спектром залежності інтенсивності сигналу (яка визначається кількістю електронів) від енергії зв'язку.

В останні десятиліття набув поширення метод **фотоелектронної спектроскопії з використанням синхротронного випромінювання**. Будь-

яке джерело синхротронного випромінювання містить обов'язкові елементи, наведені на схемі (рис. 3) [13].

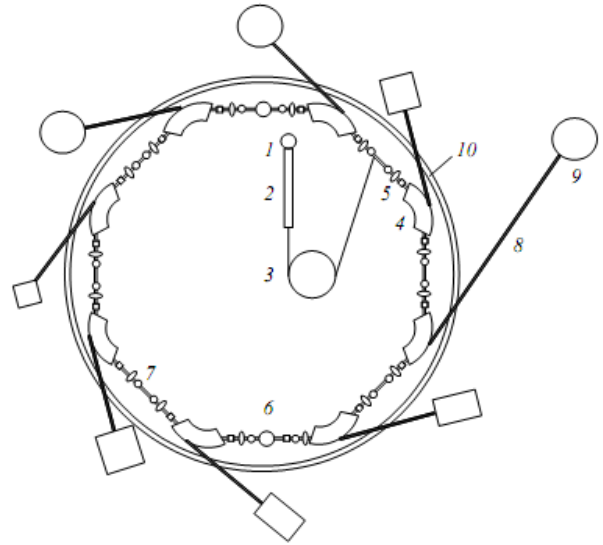


Рис.3. Схема джерела синхротронного випромінювання [13]:

- 1) електронна гармата;
- 2) лінійний передприскорювач;
- 3) кільцевий передприскорювач;
- 4) поворотний магніт;
- 5) система магнітних лінз;
- 6) радіочастотний резонатор;
- 7) лінійна ділянка камери для розміщення спеціалізованих магнітних (вбудованих) пристроїв;
- 8) канал;
- 9) експериментальна станція (лабораторія);
- 10) бетонна стіна біозахисту.

Джерелами синхротронного випромінювання є прискорювачі заряджених частинок (електронів), які працюють в стаціонарному режимі накопичувального кільця. У таких установках ультррелятивістські електрони, рухаючись по замкнутій орбіті у вакуумній камері накопичувального кільця діаметром кілька десятків метрів, випускають інтенсивне електромагнітне випромінювання з неперервним спектром від інфрачервоного до жорсткого рентгенівського. Енергія електронів у прискорювачах в залежності від конструкції може змінюватися від сотень мегаелектроновольт до кількох гігаелектроновольт.

Дослідження поверхні халькогенідних матеріалів методами фотоелектронної спектроскопії

Аморфні халькогеніди - це клас неупорядкованих напівпровідникових матеріалів, одержаних комбінацією одного або більше елементів халькогену (зазвичай S, Se, Te) з іншим хімічним елементом (як правило, As, Ge, Sb). Високі показники заломлення й оптична нелінійність, характерні для халькогенідних стекол, роблять їх привабливими для використання в якості фотонних пристроїв для надшвидкої повністю оптичної комутації та обробки даних. Ці властивості халькогенідних матеріалів пов'язані з їх структурними особливостями, які, в свою чергу, потребують детального вивчення.

Теоретичні та експериментальні дослідження останніх років показали, що двох- і трьохкомпонентні халькогенідні стекла містять значно більше основних структурних одиниць, ніж їх кристалічні аналоги [14]. Більшість структурних одиниць об'єднуються в упорядковані групи або кластери середнього порядку з різною геометрією, залежно від концентрації добавок і технології виготовлення. Геометрія цих груп в об'ємних стеклах і тонких плівках зумовлює їх фізичні властивості. Локальна структура аморфних халькогенідів у межах першої координаційної сфери (ближній порядок) може досліджуватися за допомогою рентгенівської фотоелектронної спектроскопії (РФС) та фотоелектронної спектроскопії з використанням синхротронного випромінювання. Отримані таким способом дані про структуру можуть бути надзвичайно корисними для подальшого теоретичного неемпіричного структурного моделювання та інтерпретації експериментальних результатів, що є необхідним для розширення знань про структуру неупорядкованих матеріалів (середній порядок).

Рентгенівська фотоелектронна спектроскопія застосовується для дослідження напівпровідникових матеріалів досить давно [15-18]. Так, результати дослідження легованих сріблом

плівок As_2Se_3 були опубліковані ще в 1981 році [19].

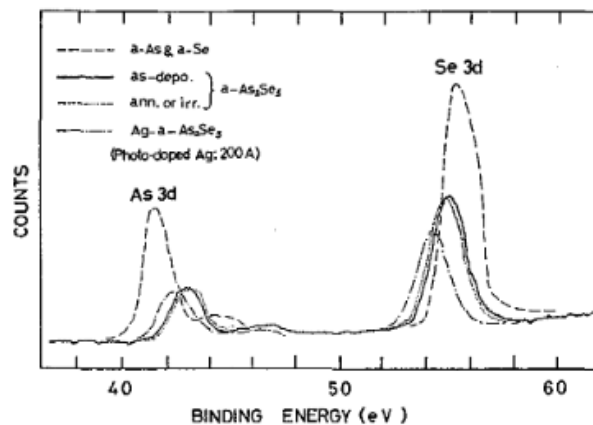


Рис. 4. As 3d та Se 3d спектри аморфних плівок As, Se, As_2Se_3 та фотолегованої Ag плівки As_2Se_3 [16]

Протягом останніх тридцяти років методом рентгенівської фотоелектронної спектроскопії досліджені двохкомпонентні халькогенідні стекла систем As-S [18,20-25], As-Se [26-32], Ge-S [33], Ge-Se [34-35] та інші. Крім того, методи фотоелектронної спектроскопії застосовувалися для дослідження потрійних халькогенідних матеріалів [36-40]. Так, авторами [39] за допомогою рентгенофотоелектронних спектрів встановлено, що із збільшенням вмісту германію у стеклах $\text{Ge}_x\text{Sb}_{10}\text{Se}_{90-x}$ (аж до $\text{Ge}_{25}\text{Sb}_{10}\text{Se}_{65}$) у структурі скла з'являються структурні одиниці з гомополярними зв'язками, кількість дефектних с.о. зменшується, а ширина забороненої зони зростає (рис. 8, 9).

Крім визначення компонентного складу поверхні ХСН матеріалів, фотоелектронна спектроскопія дає змогу оцінювати відносну кількість тих чи інших структурних одиниць (с.о.) у досліджуваному матеріалі, розкладаючи виміряні спектри основних рівнів на компоненти, кожна з яких відповідає певній с.о. [23-29,35,39-40].

При вимірюванні фотоелектронних спектрів, одержаних з використанням синхротронного випромінювання, у напівпровідникових матеріалах з шириною забороненої зони більше 3 еВ виникає проблема накопичення позитивного заряду

на поверхні зразка в результаті вилітання фотоелектронів. Таке зарядження поверхні спричинює спотворення форми спектрів та зміщення їх по енергії. Для вирішення цієї проблеми на очищену (відпалену) поверхню зразка напиляють наночар металу (як правило, золота).

Ще однією суттєвою перевагою описаних методів фотоелектронної спектроскопії є можливість напилення тонких шарів досліджуваного матеріалу та його послідуєчне дослідження в одному технологічному циклі (“*in situ*”), що дозволяє уникнути забруднення зразка сторонніми домішками [41].

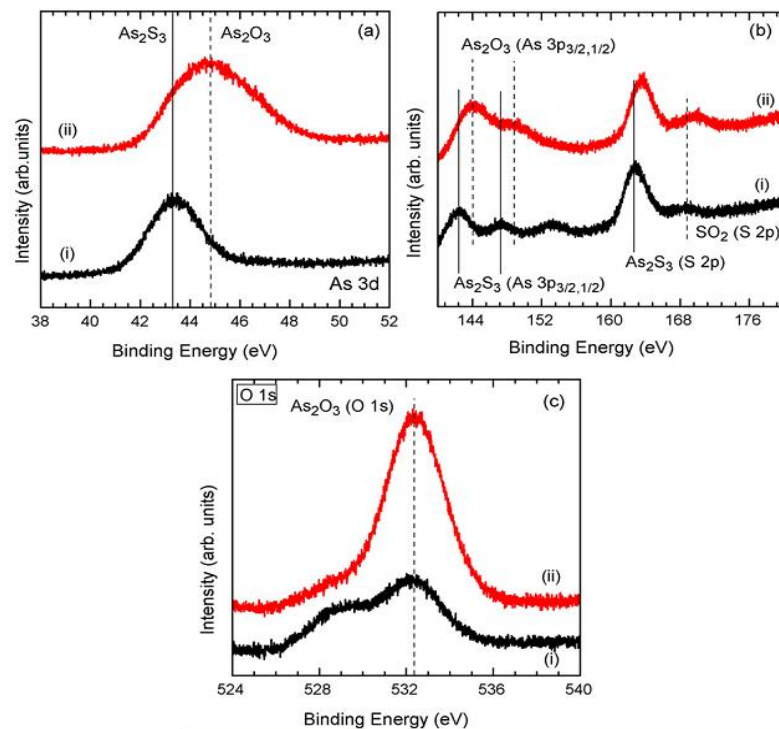


Рис. 5. Рентгенофотоелектронні спектри аморфного As_2S_3 хвиляводу, виміряні до (i) та після обробки (ii) плазмою O_2 . Спектри основного рівня As 3d наведені на рисунку (a), As 3p та S 2p – на (b) та O 1s на рисунку (c) [21].

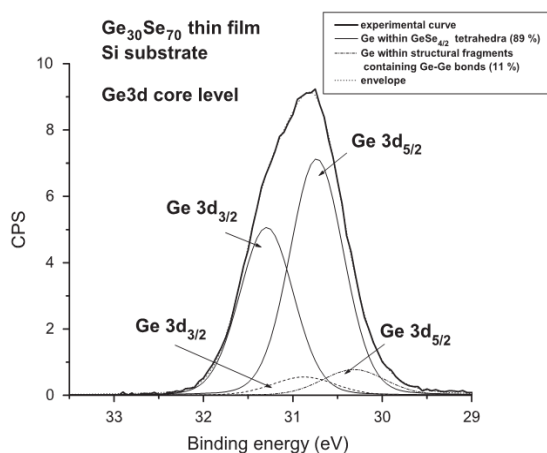


Рис. 6. Результат розкладання на компоненти РФ спектра основного рівня Ge 3d термічно напиленої плівки $\text{Ge}_{30}\text{Se}_{70}$ [35].

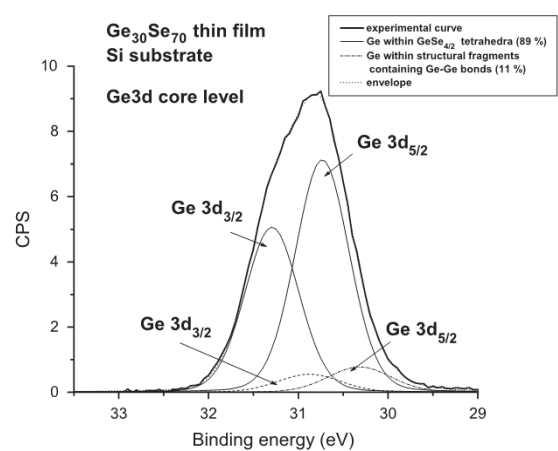


Рис. 7. Результат розкладання на компоненти РФС спектра основного рівня Se 3d термічно напиленої плівки $\text{Ge}_{30}\text{Se}_{70}$ [35].

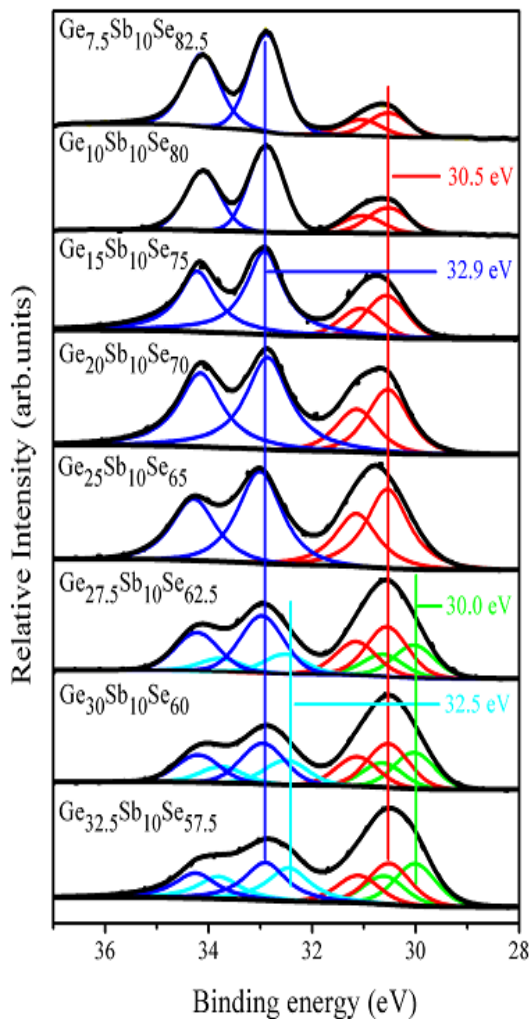


Рис. 8. Спектри основних рівнів Ge 3d та Sb 4d скла $Ge_xSb_{10}Se_{90-x}$. Зелена, червона, блакитна і синя лінії відповідають зв'язкам Ge-Ge, Ge-Se $_{4/2}$, Sb-Sb, Sb-Se $_{3/2}$ [39].

Висновки

Бурхливий розвиток сучасних технологій сприяє постійному розширенню спектру методів теоретичного й експериментального дослідження властивостей та структури матеріалів з метою розробки ефективніших елементів мікро- та наноелектроніки, нелінійної оптики, пристроїв запису та зберігання інформації, логічних елементів.

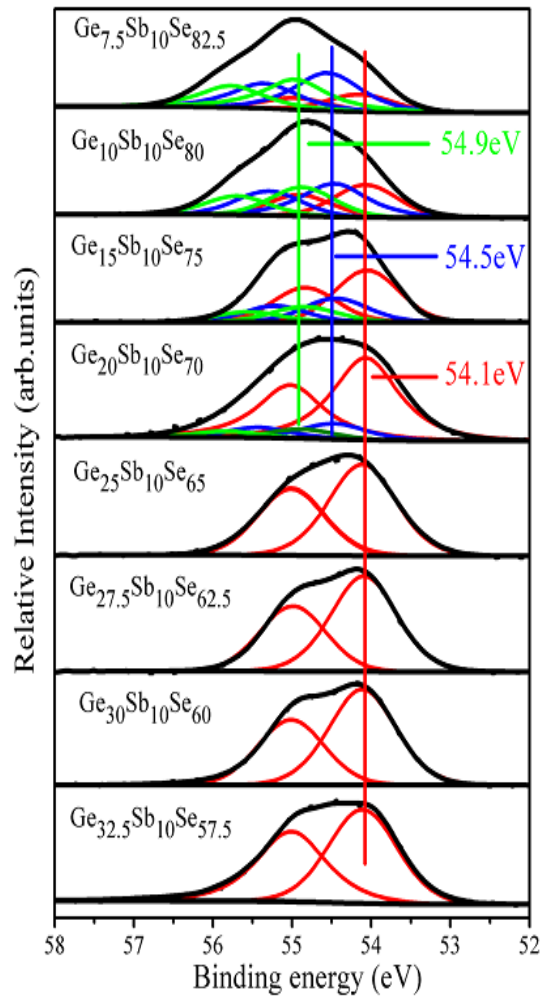


Рис. 9. Спектри основного рівня Se 3d скла $Ge_xSb_{10}Se_{90-x}$. Червона, синя і зелена лінії відповідають с.о. Ge(Sb)-Se-Ge(Sb), Se-Se-Ge(Sb) та Se-Se-Se [39].

Аналіз численних публікацій у вітчизняних та міжнародних провідних наукових виданнях показує, що фотоелектронна спектроскопія, зокрема із використанням синхротронного випромінювання, на сьогодні є оптимальним методом дослідження структурних особливостей поверхні та фізичних властивостей матеріалів, в тому числі і некристалічних халькогенідів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Kolomiets T. Vitreous semiconductors (I), (II). // *Phys. Stat. Sol.* – 1964.- 7.- PP. 359-372, 713-731.
2. Mott N.F., Davis E.A. *Electronic processes in non-crystalline materials.* - London: Oxford Univ. Press, 1971.- 448 p.
3. Фельц А. Аморфные и стеклообразные неорганические твёрдые тела: Пер. с нем. - М.: Мир, 1986. - 558с.
4. Kolobov A. V. , Tominaga J. Chalcogenide glasses as prospective materials for optical memories and optical data storage // *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* – 2003.- 14.- pp. 677-680.
5. Holomb R., Mitsa V., Johansson P., Veres M. Boson peak in low-frequency Raman spectra of As_xS_{100-x} glasses: nanocluster contribution // *Phys. Status Solidi C.*- 2010.- 7, 3–4.- pp. 885-888.
6. 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 $As(Sb,Bi)_2S_3$ films // *Phys. Status Solidi C.*- 2010.- 7, 3–4.- pp. 893-896.
7. Holomb R. Nanostructures in chalcogenide glasses: experimental spectroscopy and first-principles calculations // *Materials of the meeting “Clusters and Nanostructured Materials” (CNM-2006).* Part 2. – Uzhhorod, 2006. – P.366-367.
8. Choi D.-Y., Madden S., Bulla D., Wang R., Rode A., Luther-Davies B. Thermal annealing of arsenic tri-sulphide thin film and its influence on device performance // *J. Appl. Phys.* – 2010.- 107.- 053106-6.
9. Valdes H., Sanches-Polo M. and C.A. Zador. Effect of ozonation on the activated carbon surface chemical properties and on 2-mercaptobenzothiazole adsorption // *Latin American Applied Research.*- 2003.- 33.- pp. 219-223.
10. Борисов С. Ф.. Межфазная граница газ-твёрдое тело: структура, модели, методы исследования. Учебн. пособие.– Екатеринбург, 2001.– 205 с.
11. Методы анализа поверхностей / Под ред. А. Зандерны. – М.: Мир, 1979. – 562 с.
12. Карлсон Т. Фотоэлектронная и оже-спектроскопия. – Л.: Машиностроение, 1981. – 431 с.
13. Зубавичус Я. В., Словохотов Ю. Л. Рентгеновское синхротронное излучение в физико-химических исследованиях // *Успехи химии.* – 70 (5). – 2001. – с.429-465.
14. Holomb R., Veres M., Mitsa V. 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.*- 2009.- 11(7), pp. 917 - 923.
15. Zhang F., Chen G., Xu X. EELS And XPS Investigation On Amorphous Silicon Carbide Alloy Film.- *Proc. SPIE.*- 1985.- II, 112.- p. 0524.
16. Bose D. N., Hedge M. S., Basu S., Mandal K. C. XPS investigation of CdTe surfaces: effect of Ru modification // *Semiconductor Science and Technology.* – 1989.- 4(10).- pp. 866 - 870.
17. Williams R. H., Forsyth N., Dharmadasa I. M., Sobiesierski Z. Metal contacts to II-VI semiconductors: CdS and CdTe // *Appl. Surf. Sci.* – 1990. - 41-42.- pp. 189-194.
18. Petkov K., Krastev V., Marinova Ts. XPS study of amorphous As_2S_3 films deposited onto chromium layers // *Surface and Interface Analysis.* – 1994. – V. 22, Iss. 1-12. – pp. 202-205.
19. Ueno T., Odajima A. Silver-doped amorphous As_2Se_3 films studied by XPS // *Journal de Physique Colloques.* – 1981. - 42 (C4), pp.C4-899-C4-902.-
20. Bolle N., Hertogen P., Adriaenssens G. J., Sénemaud C., Gheorghiu - de La Rocque A. Cu-induced changes in properties of the arsenic chalcogenides // *ФТП.*- 1998. – Т. 32, № 8. – СС. 976-980.
21. Pope A., Schulte A., Guo Y., Ono L. K., Roldan Cuenya B., Lopez C., Richardson K., Kitanovski K., Wunningham T. Chalcogenide waveguide

- structures as substrates and guiding layers for evanescent wave Raman spectroscopy of bacteriorhodopsin // *Vibrational Spectroscopy*. – 2006. – 42. – pp. 249–253.
22. Kovalskiy A., Jain H., Mitkova M. Evolution of chemical structure during silver photodiffusion into chalcogenide glass thin films // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2009. – 355. – pp. 1924–1929.
 23. Holomb R., Kondrat O., Popovich N., Mitsa V., Tsud N., Cháb V., Matolín V., Prince K. C., Veres M. Laser photomodification of As_2X_3 ($X=S, Se$) nanolayers: synchrotron radiation photoelectron spectroscopy combined with surface-enhanced raman and *ab initio* dft studies // Abstracts of international meeting “CLUSTERS AND NANOSTRUCTURED MATERIALS” (CNM-3). - Uzhhorod, Vodohraj, Ukraine, October 14-17, 2012. - P.152.
 24. Mitsa V., Holomb R., Kondrat A., Popovich N., Veresh M., Csik A., Vondráček M., Tsud N., Matolin V., Prince K. C., Fekeshgazi I. Oxidation and photo-eged studies of graphen-like two-dimensional arsenic-, germanium sulfide crystals and nanostructured glasses // XV Int. conf. “Physics and technology of thin films and nanosystems”. Conference proceedings. – Iv.-Frankivsk, Ukraine, May 11-16, 2015. - PP.38-39.
 25. Kovalskiy A., Golovchak R., Vlcek M., Jain H. Electronic and atomic structure of amorphous thin films with high-resolution XPS: Examples of applications & limitations // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2013. – V/377. – PP.155–158./
 26. Kondrat O., Holomb R., Popovich N., Tsud N., Mitsa V. Compositional investigations of the As-Se nanolayers using X-ray photoelectron spectroscopy // XV International conference “Physics and technology of thin films and nanosystems”. Conference proceedings. – Iv.-Frankivsk, Ukraine, May 11-16, 2015. – P.175.
 27. Kondrat O. B., Holomb R. M., Popovych N. I., Tsud N., Mitsa V. M. XPS investigation of photostructural changes of $As_{20}Se_{80}$ nanolayers // Cluster and nanostructured materials (CNM'4). Program and Materials. – Uzhgorod, Ukraine, 12-16 October, 2015. – P.88.
 28. Kondrat O., Popovych N., Holomb R., Mitsa V., Tsud N. Structural changes of $As_{40}Se_{60}$ nanolayers studied by X-ray photoelectron spectroscopy // Materials of XIV International conference “Physics and technology of thin films and nanosystems”. – Iv.-Frankivsk, Ukraine, 2013. – P. 390.
 29. Kondrat O., Popovich N, Holomb R., Mitsa V., Petrachenkov O., Lyamaev V., Tsud N. XPS investigation of laser-induced structural changes in $As_{50}Se_{50}$ nanolayers // Materials of XIII International conference “Physics and technology of thin films and nanosystems”. – Iv.-Frankivsk, Ukraine, 2011. Book of abstracts. V.2. – P. 29.
 30. Kalyva M., Siokou A., Yannopoulos S. N., Wagner T., Orava J., Frumar M. Ag diffusion in amorphous $As_{50}Se_{50}$ films studied by XPS // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2009. – 355. – PP. 1844–1848.
 31. Кондрат О., Попович Н., Голомб Р., Петраченков О., Цуд Н., Міца В. Процеси самоорганізації в тонкоплівкових $As_{40}Se_{60}$ нанопарах при нормальних умовах та при дії лазерного опромінення // *Фізика і хімія твердого тіла*. – 2013. – Т.14. - № 4. – СС. 800-804.
 32. Antoine K., Jain H., Li J., Drabold D.A., Vlcek M., Miller A.C. Photoinduced changes in the electronic structure of As_4Se_3 glass // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2004. – V. 349. – PP. 162–167.
 33. Mitsa V., Ivanda M., Gamulin O., Holomb R., Kondrat O., Popovych N., Lovas G., Petreckiy S., Tsud N., Matolín V., Prince K.C. Luminescence, Raman and synchrotron XPS study of amorphous Ge_2S_3 based films // Proceedings of the 35th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics MIPRO 2013/MEET. – PP.34-39.

34. Golovchak R., Shpotyuk O., Kozyukhin S., Kovalskiy A., Miller A. C., Jain H. Structural paradigm of Se-rich Ge—Se glasses by high-resolution x-ray photoelectron spectroscopy. // *Journal of Applied Physics*. – 2009. - Vol. 105, Iss. 10. – PP. 103704.
35. Kovalskiy A., Miller A.C., Jain H. In Situ Measurements of X-Ray-Induced Silver Diffusion into a-Ge₃₀Se₇₀ Thin Film // *J. Am. Ceram. Soc.* – 2008. - 91 [3]. – PP. 760–765.
36. Li W., Seal S., Lopez C., Richardson K.A. X-ray photoelectron spectroscopic investigation of surface chemistry of ternary As–S–Se chalcogenide glasses // *Journal of Applied Physics*.- 2002.- VOL. 92, № 12. – PP. 7102-7108.
37. Naik R. Influence of laser irradiation on the optical properties of As₄₀Se₄₅Sb₁₅ thin films by thermal evaporation technique // *Adv. Mater. Lett.* – 2015. - 6(6), - PP.531-537.
38. Guery G., Musgraves D. J., Labrugère C., Fargin E., Cardinal T. et al.. Evolution of glass properties during a substitution of S by Se in Ge₂₈Sb₁₂S_{60-x}Se_x glass network // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2012. - 358 (15). - PP.1740-1745.
39. Wei W.-H., Xiang S., Xu S.-W., Fang L., Wang R.-P. Structural investigation on Ge_xSb₁₀Se_{90-x} glasses using x-ray photoelectron spectra // *Journal of Applied Physics*. – 2014. – 115. – PP.183506 (1-4).
40. Sati D.C., Purohit L.P., Mehra R.M., Kovalski A., Golovchak R., Jain H. Structural investigation of SbGeSe glasses by high resolution x-ray photoelectron spectroscopy // *J. Nano- Electron. Phys. (Sumy State University)*. - 2011. - 3, No1, - PP. 302-307.
41. Kondrat O., Holomb R., Popovich N., Mitsa V., Veres M., Csik A., Tsud N., Matolín V., Prince K.C. Local surface structure and structural properties of As-Se nanolayers studied by synchrotron radiation photoelectron spectroscopy and DFT calculations // *Journal of Non-Crystalline Solids*. - Vol.410C.- pp. 180-185.

Стаття надійшла до редакції 10.07.2015.

N.I.Popovych

Uzhhorod National University, 88000, Uzhhorod, Voloshyna str., 54

APPLICATION OF PHOTOELECTRON SPECTROSCOPY METHODS FOR INVESTIGATION OF SUBSURFACE LAYERS OF AMORPHOUS CHALCOGENIDE MATERIALS

The possibility of using the methods of X-ray photoelectron spectroscopy and photoelectron spectroscopy using synchrotron radiation was analyzed to study the structure of non-crystalline semiconductor materials, including chalcogenides. Advantages and disadvantages of these methods in case of studies of thin layers or surface of chalcogenide glasses were discovered.

Keywords: X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), photoelectron spectroscopy using synchrotron radiation (SRPES), amorphous chalcogenides, structural units.

Н. И. Попович

Ужгородский национальный университет, 88000, Ужгород, ул. Волошина, 54,

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ФОТОЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ НЕКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Проанализирована возможность применения методов рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и фотоэлектронной спектроскопии с использованием синхротронного излучения для исследования структуры некристаллических полупроводниковых материалов, в частности халькогенидных. Выявлены преимущества и недостатки этих методов в случае исследования тонких слоев или поверхности халькогенидных стекол.

Ключевые слова: рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (XPS), фотоэлектронная спектроскопия с использованием синхротронного излучения (SRPES), некристаллические халькогениды, структурные единицы.