

УДК 621.315.592

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2022-2-8>

Тетяна ЯЦИНЮК

аспірант навчально-наукового фізико-технологічного інституту, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Воли 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0001-7288-3189

SCOPUS-AUTHOR ID: 57658704300

Андрій КЕВШИН

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри експериментальної фізики, інформаційних та освітніх технологій навчально-наукового фізико-технологічного інституту, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Воли 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0002-3581-8852

SCOPUS-AUTHOR ID: 35422272900

Володимир ГАЛЯН

доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри експериментальної фізики, інформаційних та освітніх технологій навчально-наукового фізико-технологічного інституту, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Воли 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0003-0066-7174

SCOPUS-AUTHOR ID: 35422525700

Інна ІВАЩЕНКО

кандидат хімічних наук, професор кафедри хімії та технологій факультету хімії, екології та фармації, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Воли 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0001-9724-0737

SCOPUS-AUTHOR ID: 7003831212

Віталій АРТЮХ

аспірант навчально-наукового фізико-технологічного інституту, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Воли 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0002-7785-6072

Костянтин МЕЛЬНИЧУК

студент навчально-наукового фізико-технологічного інституту, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Воли 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0001-5666-0698

Дмитро ІВАНЮК

студент навчально-наукового фізико-технологічного інституту, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Воли 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0003-0807-2140

Бібліографічний опис статті: Яцинюк, Т., Кевшин, А., Галян, В., Іващенко, І., Артюх В., Мельничук, К., Іванюк, Д. (2022). Вплив дефектів і домішок на структуру та властивості халькогенідних напівпровідників. *Фізика та освітні технології*, 2, 54–60, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-2-8>

ВПЛИВ ДЕФЕКТІВ І ДОМІШОК НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ХАЛЬКОГЕНІДНИХ НАПІВПРОВІДНИКІВ

Багатокомпонентні халькогенідні напівпровідники характеризуються високою концентрацією різних типів дефектів. Ефекти, що індуковані світлом (фотокристалізація, фотоіндукована анізотропія, фотоаморфізація,

збільшення щільності речовини при освітленні, фото- потемніння та просвітління) є найбільше поширеними, в халькогенідних стеклах і обумовлюють трансформації структури та виникнення дефектних станів.

Фотоіндуковані явища та відповідні структурні зміни в халькогенідних стеклах теоретично обґрунтовані на основі існування заряджених дефектів зв'язку, які бувають трьох типів: D^+ , D^- і D^0 . Точковий дефект у вигляді атома з обірваним зв'язком може не містити у точці розриву електрони (D^+), мати один електрон (D^0) або два електрони (D^-). Точкові дефекти з обірваним зв'язком є причиною великої кількості електронних переходів, що зумовлюють люмінесценцію, оптичне поглинання, термічне збудження та рекомбінацію.

Структурна впорядкованість та властивості кристалічних матеріалів визначаються наявністю в них рівноважних і нерівноважних дефектів решітки. Зокрема, пластична деформація кристалів зводиться до руху різних дефектів решітки, теплове розширення кристалів обумовлено не тільки ангармонізмом коливань атомів, а й зростанням концентрації дефектів кристалічної решітки.

Проаналізовано роботи, які присвячені дослідженню впливу γ -опромінення на оптичні та електричні властивості напівпровідників. Встановлено, що збільшення дози опромінення приводить до зменшення інтенсивності фотолюмінесценції як у кристалічних, так і в склоподібних зразках. Особливо чутливі до впливу радіації виявились селенідні стекла та кристали. Дослідження процесів дефектоутворення в халькогенідних напівпровідниках створює нові можливості для синтезу матеріалів перспективних в оптоелектронній техніці.

Ключові слова: Халькогенідний напівпровідник, точковий дефект, модель структури, обірваний зв'язок.

Tetiana YATSYNIUK

graduate student of the Educational and Scientific Institute of Physics and Technology, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0001-7288-3189

SCOPUS-AUTHOR ID: 57658704300

Andriy KEVSHYN

candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate professor of the department of experimental physics, information and educational technologies of the Educational and Scientific Institute of Physics and Technology, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0002-3581-8852

SCOPUS-AUTHOR ID: 35422272900

Volodymyr HALYAN

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the department of experimental physics, information and educational technologies of the Educational and Scientific Institute of Physics and Technology, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0003-0066-7174

SCOPUS-AUTHOR ID: 35422525700

Inna IVASHCHENKO

candidate of chemical sciences, professor of the Department of Chemistry and Technologies, Faculty of Chemistry, Ecology and Pharmacy, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0001-9724-0737

SCOPUS-AUTHOR ID: 7003831212

Vitalii ARTIUKH

graduate student of the Educational and Scientific Institute of Physics and Technology, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0002-7785-6072

Kostiantyn MELNYCHUK

student of the Educational and Scientific Institute of Physics and Technology, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0001-5666-0698

Dmytro IVANIUK

student of the Educational and Scientific Institute of Physics and Technology, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0003-0807-2140

To cite this article: Yatsyniuk, T., Kevshyn, A., Halyan, V., Artiukh, V., Melnychuk, K., Ivanyuk, D. (2022). Vplyv defektiv i domishok na strukturu ta vlastyvoli khalkohenidnykh napivprovodnykiv [Influence of defects and impurities on the structure and properties of chalcogenated semiconductors]. *Physics and Educational Technology*, 2, 54–60, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-2-8>

INFLUENCE OF DEFECTS AND IMPURITIES ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF CHALCOGENATED SEMICONDUCTORS

Multicomponent chalcogenide semiconductors are characterized by a high concentration of various types of defects. Effects induced by light (photocrystallization, photoinduced anisotropy, photoamorphization, increase in density of matter under illumination, photodarkening, and brightening) are the most common in chalcogenide glasses and cause structural transformations and the emergence of defect states.

Photoinduced phenomena and corresponding structural changes in chalcogenide glasses are theoretically grounded on the basis of charged bond defects, which are of three types: D^+ , D^- , and D^0 . A point defect in the form of an atom with a broken bond may contain no electrons at the breaking point (D^+), have one electron (D^0) or two electrons (D^-). Point defects with a broken bond are responsible for a large number of electronic transitions that cause luminescence, optical absorption, thermal excitation, and recombination.

The structural ordering and properties of crystalline materials are determined by the presence of equilibrium and non-equilibrium lattice defects in them. In particular, the plastic deformation of crystals is reduced to the movement of various lattice defects, the thermal expansion of crystals is caused not only by the anharmonicity of atomic vibrations, but also by the increase in the concentration of crystal lattice defects.

The works devoted to the study of the effect of γ -irradiation on the optical and electrical properties of semiconductors were analyzed. It was established that an increase in the irradiation dose leads to a decrease in the intensity of photoluminescence in both crystalline and vitreous samples. Selenide glasses and crystals turned out to be particularly sensitive to the influence of radiation. The study of defect formation processes in chalcogenide semiconductors creates new opportunities for the synthesis of promising materials in optoelectronic technology.

Key words: chalcogenide semiconductor, point defect, structure model, broken bond.

Вступ

Багатокомпонентні халькогенідні напівпровідники – це винятковий клас матеріалів, що містять один або декількох халькогенних елементів (сірки, селену, телуру) і характеризуються високою концентрацією дефектів. У більшості, вони мають технологічне походження: у стеклах виникають завдяки швидкому охолодженню з розплаву, в кристалах – під час синтезу, в результаті теплових флуктуацій атомів речовини. Крім того, дефекти можуть бути індуковані світлом або внаслідок радіаційного опромінення.

Найбільше поширеними ефектами, що індукуються світлом, в халькогенідних стеклах є: фотокристалізація, фотоіндукована анізотропія, фотоаморфізація, збільшення щільності речовини при освітленні, фото-потемніння та просвітління. Ці ефекти пов'язані зі змінами показника заломлення, коефіцієнта оптичного поглинання, енергії забороненої зони, об'єму та основних оптичних констант. Халькогенідні склоподібні напівпровідники є метастабільними внаслідок відсутності далекого порядку в цих матеріалах. Їх структура може трансформуватися з одного метастабільного стану в інший, завдяки, так званій, «структурній гнучкості».

Результати досліджень

Матеріали, в яких введено халькоген (S, Se і Te) проявляють ковалентні зв'язки із сусідніми хімічними елементами в стабільних конденсованих фазах згідно з правилом Н. Мотта (8-N) (Мотт, 1982). У цьому механізмі серед шести зовнішніх електронів із конфігурацією s^2p^4 чотири електрони р стану беруть участь у ковалентному зв'язку, а решта два електрони, які не зв'язані називають «одинокую парою».

Протягом багатьох років науковці працювали над відповідними методиками щодо визначення щільності дефектних станів. Наприклад, М. Брінза (Brinza, 2005) досліджував швидкість спаду фотоструму в халькогенідних стеклах і дійшов висновку, що щільність станів у «хвостах» енергетичних зон зменшується хаотично та не містить чітко визначеної закономірності. А. Закері, С. Елліот (Zakery, 2005) припустили, що у «хвостах» енергетичних зон існують особливі густини станів, які обумовлені модифікованими валентними парами електронів (Такака, 1984). За допомогою цієї моделі було пояснено відсутність фотозатемнення у тонких плівках As_2S_3 , товщина яких становить менше 50 нм. Це явище не зустрічається в інших аморфних напівпровідниках та в кристалічних халькогенідах.

Серед фотоіндукованих процесів відзначимо цікаве явище, яке спостерігали автори роботи (Kuzukawa, 1998) в аморфних плівках. Під дією світла деякі з них розширюються (плівки $a\text{-As}_2\text{S}_3$, $a\text{-As}_2\text{Se}_3$), а інші, такі як $a\text{-GeS}_2$, $a\text{-GeSe}_2$, стискаються.

Отже, спостережувані фотоіндуковані зміни в халькогенідах можуть бути двох типів – незворотні та оборотні фотоіндуковані модифікації. В обох випадках відбуваються деякі фотохімічні реакції або фотоструктурні зміни аморфних халькогенідних систем. Для пояснення цих явищ Р. Стріт (Street, 1977) запропонував модель впливу світла на властивості аморфних халькогенідних систем, засновану на створенні в процесі його дії електрично заряджених дефектів внаслідок розриву ковалентних зв'язків. Згідно з цією моделлю, генерація електронно-діркових пар відбувається після поглинання фотонів, внаслідок чого виникає квазічастинка – екситон. Збудження екситонів збільшує коефіцієнт поглинання, що приводить до зсуву краю оптичного поглинання. Ця модель передбачає зміну валентних пар, коли розриваються катіон-аніонні зв'язки і утворюються гомополярні зв'язані пари.

Н. Тойозава та К. Танака (Toyosava, 1996) для пояснення явищ фотозатемнення та відповідних структурних змін теоретично обґрунтували існування заряджених дефектів зв'язку, які бувають трьох типів: D^+ , D^- і D^0 . Точковий дефект у вигляді атома з обірваним зв'язком може не містити у точці розриву електрони (D^+), мати один електрон (D^0) або два електрони (D^-). Індекс позначає заряд дефектного центру. Автори робіт (Мотт, 1982; Anderson, 1975) вказують, що внаслідок сильного викривлення решітки навколо дефекту, реакція $2D^0 \rightarrow D^+ + D^-$ є екзотермічною, тому при нормальних умовах умовах дефекти повинні бути позитивно або негативно заряджені. Нейтральний дефект D^0 виникає тільки в результаті збудження, внаслідок дії зовнішніх чинників. На рис. 1 показана енергетична діаграма з системою енергетичних рівнів, які відповідають дефектним центрам D^+ , D^- , D^0 . Рівні А, В, С розташовані вище стелі валентної зони, для яких енергії E_A , E_B , E_C відповідають переходам між D^+ , D^- -центрами, W – енергія полярона. Рівні А', В', С' відповідають переходам між D^- , D^0 -центрами. E_1 , E_2 позначають енергії термічного збудження D^- , D^0 -цен-

трів у відповідності з реакціями: $D^- \rightarrow D^0 + e$, $D^0 \rightarrow D^+ + e$.

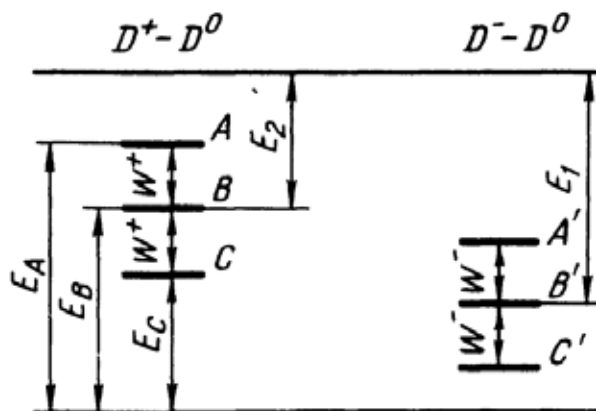


Рис. 1. Енергетична діаграма D^+ , D^- , D^0 -станів в халькогенідних матеріалах (Street, 1975)

Точкові дефекти з обірваним зв'язком (рис. 2) є причиною великої кількості електронних переходів, що зумовлюють люмінесценцію, оптичне поглинання, термічне збудження та рекомбінацію. Така модель дефектів добре пояснює ряд експериментальних явищ в халькогенідних напівпровідниках. Відсутність ЕПР-сигналу пов'язують з відсутністю неспарених електронів, тобто при нормальних умовах відсутні D^0 -центри. При освітленні матеріалу відбуваються наступні реакції: D^+ (рівень А) $\rightarrow D^0 + p$, D^- (рівень С') $\rightarrow D^0 + e$, внаслідок чого утворюються неспарені електрони на D^0 -центрах і виникає сигнал ЕПР. Модель з обірваними зв'язками (іноді називають моделлю квазіатомних дефектів) добре пояснює закріплення посередині забороненої зони рівня Фермі в широкому температурному інтервалі, провідність на постійному струмі, оптичне поглинання та фотолюмінесценцію (Street, 1975; Mott, 1975).

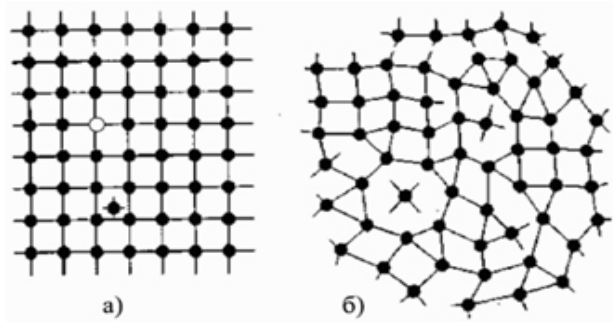


Рис. 2 Найпростіші дефекти, пов'язані з порушенням правильної координації в кристалічному (а) та аморфному (б) середовищах

Крім точкових дефектів в стеклах можуть виникати кластери, які містять декілька атомів основної речовини або домішок. Автори роботи (Shpotyuk, 2016) встановили, що введення домішок Cu, Ag, Au до склоутворюючої матриці на основі As(Ge)–S(Se) приводить до негомогенності структури та виникнення кластерів, розміри яких становлять близько 3-10 нм. Крім того, було досліджено утворення кластерів в халькогенідах (Gushchin, 2019) з участю перехідних металів п'ятої групи – V, Nb, Ta (рис. 3). Основною характерною рисою в структурі таких кластерів є утворення прямих зв'язків метал-метал, які можуть проявляти властивості фотокаталізу.

Для халькогенідних кристалів (на відміну від склоподібних) характерний далекий порядок, проте відсутня ідеальна структурна впорядкованість. Навіть при термодинамічній рівновазі існують дефекти кристалічної решітки (рис. 3 а), що є невід'ємними компонентами кристалу. Крім рівноважних дефектів решітки, існують нерівноважні, обумовлені недосконалими технологічними умовами росту кристалу. Завдяки тепловому руху ці дефекти не можуть повністю зникнути навіть за досить тривалий час. Найчастіше нерівноважні дефекти решітки стабілізуються електромагнітними полями, що виникають при рості кристалу, фазових перетвореннях або зовнішніх впливах. Концентрацію нерівноважних дефектів решітки вдається істотно знизити вдосконаленням методів отримання та обробки кристалів.

Структурна впорядкованість та властивості кристалічних матеріалів визначаються наявністю в них рівноважних і нерівноважних дефектів решітки. Зовнішні чинники (електро-

магнітне поле, температура, механічна напруга, радіація і т.п.) впливають на утворення, трансформацію, рух і анігіляцію дефектів решітки. Зокрема, пластична деформація кристалів зводиться до руху різних дефектів решітки, теплове розширення кристалів обумовлено не тільки ангармонізмом коливань атомів, а й зростанням концентрації дефектів кристалічної решітки.

Особливу увагу науковці приділяють виникненню радіаційно індукованих дефектів в напівпровідниках. Виявлено, що у склоподібних сплавах As₂S₃, AsGeSe внаслідок гамма- та нейтронного опромінення відбуваються зміни в області фундаментального поглинання (Конорова, 1985; Конорова, 1989; Конорова, 1993). Зауважимо, що в інфрачервоному спектральному діапазоні (2,5 – 25 мкм) при дії γ-опромінення на ці зразки, їх прозорість не змінилась, але виявлено значну чутливість домішкового поглинання до нейтронного опромінення (Конорова, 1989; Конорова, 1987). Роботи М. Шпотюка (Shpotyuk, 2017; Shpotyuk, 2018) присвячена дослідженню структурної модифікації халькогенідних стекел під впливом γ-опромінення та виникненню радіаційно-індукованих оптичних ефектів. Незважаючи на значну кількість робіт, присвячених дослідженню впливу γ-опромінення на оптичні та електричні властивості напівпровідників, надзвичайно мало робіт присвячено вивченню впливу радіації на ФЛ властивості халькогенідів. Зокрема, Б.Т. Коломієць і інші (Kolomiets, 1971) дослідили вплив γ-опромінення (джерело ⁶⁰Co) на рекомбінаційну ФЛ в кристалічному та склоподібному As₂S₃ і As₂Se₃. Встановлено, що збільшення дози опромінення приводить до зменшення інтенсивності ФЛ (за температури рідкого азоту) як у кристалічних, так і в склопо-

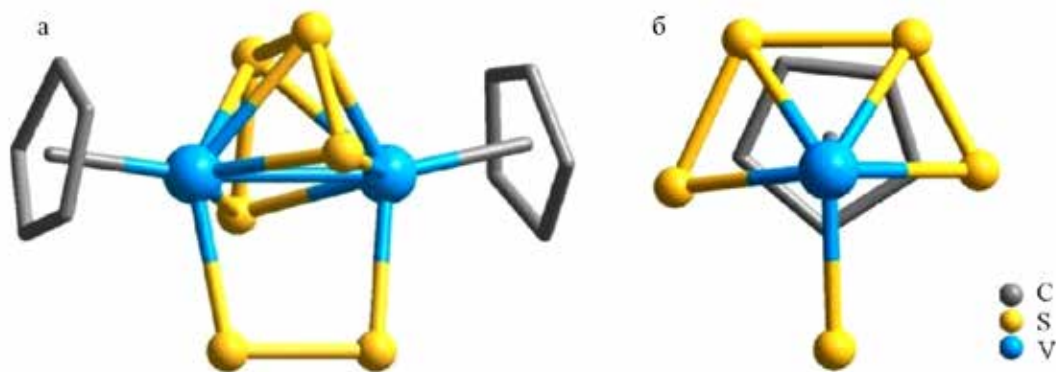


Рис. 3. Модель структури комплексу [Cr₂V₂S₆] (Gushchin, 2019)

дібних зразках. Чутливішим до впливу радіації виявились селенідні стекла та кристали. Автори роботи вважають, що причиною таких змін є виникнення радіаційно індукованих дефектів, природа яких наразі не встановлена.

Індуковані γ -променями дефекти досліджують методом ЕПР-спектроскопії. Концентрація радіаційно індукованих парамагнітних дефектів може становити $10^{16} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$, залежно від складу халькогенідної матриці та дози опромінення. Вони виникають при γ -опроміненні внаслідок обриву хімічних зв'язків халькогену.

Висновки

Отже, найважливіші властивості халькогенідних напівпровідників визначаються структурою, вмістом оптично й електрично активних

дефектів кристалічної решітки та склоутворюючої матриці. Зокрема, точкові дефекти є причиною великої кількості електронних переходів, що зумовлюють люмінесценцію, оптичне поглинання, термічне збудження та рекомбінацію. Зовнішні чинники (електромагнітне поле, температура, механічна напруга, радіація і т.п.) впливають на утворення, трансформацію, рух і анігіляцію дефектів кристалічної решітки та скляної матриці халькогенідних напівпровідників. Дослідження кількісного та якісного складу дефектів в халькогенідах і процесів поглинання/випромінювання, що зумовлено зовнішніми чинниками, створює нові можливості для конструювання матеріалів перспективних в оптоелектронній техніці.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Мотт Я., Девис Э. Электронные явления в некристаллических веществах. М.: Мир, 1982. 664 с.
2. Brinza M., Benkhedir M. L., Willekens J. [and others] Photoconductivity methods in materials research. *J. Mater. Sci. Mater. Elect.* 2005. Vol. 16. P. 703–713.
3. Zakery A., Elliott S. R. *Optical Nonlinearities in Chalcogenide Glasses and their Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. 202 p.
4. Tanaka K., Kyohya S., Odajima A. Anomaly of the thickness dependence of photodarkening in amorphous chalcogenide films. *Thin Solid Films*. 1984. V. 111. P. 195–200.
5. Kuzukawa Y., Ganjoo A., Shimakawa K. Photoinduced structural changes in obliquely deposited As- and Ge-based amorphous chalcogenides: correlation between changes in thickness and band gap. *J. Non Cryst. Solids*. 1998. V. 227–230. P. 715–718.
6. Street R. A. Non-radiative recombination in chalcogenide glasses / *Sol. Stat. Comm.* 1977. Vol. 24. P. 363–365.
7. Toyosava N., Tanaka K. Photocurrent enhancement in light-soaked As_2S_3 glass *Sol. Stat. Comm.* 1996. Vol. 97. P. 623–626.
8. Anderson P. W. Model for the Electronic Structure of Amorphous Semiconductors / *Phys. Rev. Lett.* 1975. Vol. 34, №15. P. 953–955.
9. Street R. A., Mott N. F. States in the Gap in Glassy Semiconductors / *Phys. Rev. Lett.* 1975. Vol. 35, № 19. P. 1293–1296.
10. Mott N. F., Davis E., Street R. States in the gap and recombination in amorphous semiconductors / *Phil. Mag.* 1975. Vol. 32, №5. P. 961–996.
11. Shpotyuk M. V., Shpotyuk O. I., Cebulski J., Kozyukhin S. Destructive clustering of metal nanoparticles in chalcogenide and oxide glassy matrices / *Nanoscale Res. Lett.* 2016. Vol. 11. P. 34-1–34-6.
12. Gushchin A. L., Rogachev A. V., Fomenko Y. S., Sokolov M. N. Chalcogenide Cluster Complexes of Group Five Transition Metals: Synthetic and Structural Aspects / *J. Struct. Chem.* 2019. Vol. 60 (10). P. 1531–1577.
13. Конорова Л. Ф., Ким Т. И., Жданович Н. С., Литовский М. А. Влияние γ -квантов на ИК поглощение в халькогенидных стеклообразных сплавах. *Ж. техн. физ.* 1985. Vol. 55(4). P. 788–791.
14. Конорова Л. Ф., Жданович Н. С., Дидик В. А., Прудников И. М. О структурных изменениях в стеклообразном AsGeSe , облученном большими дозами нейтронов / *ФТП*. 1989. Vol. 23(4). P. 706–709.
15. Конорова Л. Ф., Жданович Н. С. Влияние нейтронного облучения на инфракрасное поглощение в стеклообразном трисульфиде мышьяка. *ФТП*. 1993. Vol. 27(3). P. 470–473.
16. Конорова Л. Ф., Ким Т. И., Жданович Н. С., Литовский М. А. Влияние γ -квантов на ИК поглощение в стеклообразном AsGeSe , содержащим металлы / *ФТП*. 1987. Vol. 21(7), P. 1300–1302.
17. Shpotyuk M., Shpotyuk O., Golovchak R., McCloy J., Riley B. Compositional trends of γ -induced optical changes observed in chalcogenide glasses of binary As-S system / *J. Non Cryst. Solids*. 2014. Vol. 386. P. 95–99.
18. Shpotyuk M., Kovalskiy A., Golovchak R., Shpotyuk O. Phenomenology of γ -irradiation-induced changes in optical properties of chalcogenide semiconductor glasses: A case study of binary arsenic sulfides. *J Non Cryst Solids*. 2018. Vol. 498. P. 315–322.

19. Kolomiets B. T., Mamontova T. N., Domoryad I. A., Babaev A. A. Photoluminescence in γ -irradiated vitreous and monocrystalline As_2S_3 and As_2Se_3 / Phys. Stat. Sol. (a). 1971. Vol. 7. P. K29–K32.

REFERENCES:

1. Mott Ya., Devis E. Elektronnie yavleniya v nekristallicheskih veshchestvakh. M.: Mir, 1982. 664 s.
2. Brinza M., Benkhedir M. L., Willekens J. [and others] Photoconductivity methods in materials research . J. Mater. Sci. Mater. Elect. 2005. Vol. 16. P. 703–713.
3. Zakery A., Elliott S. R. Optical Nonlinearities in Chalcogenide Glasses and their Applications. Berlin, Heidelberg : Springer, 2010. 202 p.
4. Tanaka K., Kyohya S., Odajima A. Anomaly of the thickness dependence of photodarkening in amorphous chalcogenide films. Thin Solid Films. 1984. V. 111. P. 195–200.
5. Kuzukawa Y., Ganjoo A., Shimakawa K. Photoinduced structural changes in obliquely deposited As- and Ge-based amorphous chalcogenides: correlation between changes in thickness and band gap. J. Non Cryst. Solids. 1998. V. 227–230. P. 715–718.
6. Street R. A. Non-radiative recombination in chalcogenide glasses / Sol. Stat. Comm. 1977. Vol. 24. P. 363–365.
7. Toyosava N., Tanaka K. Photocurrent enhancement in light-soaked As_2S_3 glass Sol. Stat. Comm. 1996. Vol. 97. P. 623–626.
8. Anderson P. W. Model for the Electronic Structure of Amorphous Semiconductors / Phys. Rev. Lett. 1975. Vol. 34, №15. P. 953–955.
9. Street R. A., Mott N. F. . States in the Gap in Glassy Semiconductors / Phys. Rev. Lett. 1975. Vol. 35, №19. P. 1293–1296.
10. Mott N. F., Davis E., Street R.. States in the gap and recombination in amorphous semiconductors /. Phil. Mag. 1975. Vol. 32, №5. P. 961–996.
11. Shpotyuk M. V., Shpotyuk O. I., Cebulski J., Kozyukhin S. Destructive clustering of metal nanoparticles in chalcogenide and oxide glassy matrices / Nanoscale Res. Lett. 2016. Vol. 11. P. 34-1–34-6.
12. Gushchin A. L., Rogachev A. V., Fomenko Y. S., Sokolov M. N. Chalcogenide Cluster Complexes of Group Five Transition Metals: Synthetic and Structural Aspects / J. Struct. Chem. 2019. Vol. 60 (10). P. 1531–1577.
13. Konorova L. F., Kym T. Y., Zhdanovych N. S., Lytovskiy M. A. Vliyanye γ -kvantov na YK pohloshchenye v khalkohenydnykh stekloobraznykh splavakh. Zh. tekhn. fiz. 1985. Vol. 55(4). P. 788–791.
14. Konorova L. F., Zhdanovych N. S., Dydyk V. A., Prudnykov Y. M.. O strukturnykh yzmeneniyakh v stekloobraznom $AsGeSe$, obluchennom bolshymy dozamy neutronov / FTP. 1989. Vol. 23(4). P. 706–709.
15. Konorova L. F., Zhdanovych N. S.,. Vliyanye neutronnogo oblucheniya na infrakrasnoe pohloshchenye v stekloobraznom trysulfyde myshiaka. FTP. 1993. Vol. 27(3). P. 470–473.
16. Konorova L. F., Kym T. Y., Zhdanovych N. S., Lytovskiy M. A.. Vliyanye γ -kvantov na YK pohloshchenye v stekloobraznom $AsGeSe$, sodержashchym metally / FTP. 1987. Vol. 21(7), P. 1300–1302.
17. Shpotyuk M., Shpotyuk O., Golovchak R., McCloy J., Riley B. Compositional trends of γ -induced optical changes observed in chalcogenide glasses of binary As-S system / J. Non Cryst. Solids. 2014. Vol. 386. P. 95–99.
18. Shpotyuk M., Kovalskiy A., Golovchak R., Shpotyuk O. Phenomenology of γ -irradiation-induced changes in optical properties of chalcogenide semiconductor glasses: A case study of binary arsenic sulfides . J Non Cryst Solids. 2018. Vol. 498. P. 315–322.
19. Kolomiets B. T., Mamontova T. N., Domoryad I. A., Babaev A. A. Photoluminescence in γ -irradiated vitreous and monocrystalline As_2S_3 and As_2Se_3 / Phys. Stat. Sol. (a). 1971. Vol. 7. P. K29–K32.