

УДК 621.315.592

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-16>

Тетяна ЯЦИНЮК

аспірантка кафедри експериментальної фізики, інформаційних та освітніх технологій, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7288-3189>

SCOPUS-AUTHOR ID: 57658704300

Володимир ГАЛЯН

доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри експериментальної фізики, інформаційних та освітніх технологій, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0066-7174>

SCOPUS AUTHOR ID: 35422525700

Андрій КЕВШИН

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри експериментальної фізики, інформаційних та освітніх технологій, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3581-8852>

SCOPUS AUTHOR ID: 35422272900

Ганна ШАВАРОВА

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри експериментальної фізики, інформаційних та освітніх технологій, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0251-9327>

SCOPUS AUTHOR ID: 6506685303

Віталій АРТЮХ

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7785-6072>

Богдан СВІТЛИКОВСЬКИЙ

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-0113-3726>

Бібліографічний опис статті: Яцинюк, Т., Галян, В., Кевшин, А., Шаварова, Г., Артюх, В., Світліковський, Б. (2025). Оптичне поглинання стекол системи $\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-GeS}_2\text{-Sb}_2\text{S}_3$ легованих Er та Nd. *Фізика та освітні технології*, 1, 120–127, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-16>

**ОПТИЧНЕ ПОГЛИНАННЯ СТЕКОЛ СИСТЕМИ $\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-GeS}_2\text{-Sb}_2\text{S}_3$
ЛЕГОВАНИХ Er ТА Nd**

Оптичне поглинання в халькогенідних напівпровідниках є важливим як з фундаментальної, так і з прикладної точок зору. Аналіз спектрів оптичного поглинання в халькогенідних склоподібних сплавах допомагає розкрити електронну структуру та природу хімічних зв'язків у цих матеріалах та сприяє глибшому розумінню фізики неупорядкованих систем. Дослідження оптичних властивостей халькогенідних стекол сприяє розробці нових

матеріалів з покращеними характеристиками, а також допомагає виявити наявність дефектів і домішок, які можуть впливати на їх оптичні та фотоелектричні властивості.

Досліджено спектри оптичного поглинання стекол 20 моль. % Ga_2S_3 – 60 моль. % GeS_2 – 20 моль. % Sb_2S_3 та 25 моль. % Ga_2S_3 – 30 моль. % GeS_2 – 45 моль. % Sb_2S_3 одночасно легованих Er та Nd в діапазоні 550 – 2000 нм при кімнатній температурі. Край оптичного поглинання стекол знаходиться близько 600 нм і не зазнає суттєвих змін при їх легуванні Er та Nd . Зареєстровано вузькі смуги поглинання з максимумами 655, 755, 810, 885, 980 і 1540 нм, що відповідають переходам в f -оболонці іонів Er^{3+} і Nd^{3+} .

З графіка, що визначає край оптичного поглинання, екстраполяцією лінійної ділянки експериментальної кривої до перетину з віссю абсцис оцінено оптичну ширину забороненої зони стекол. Встановлено, що при збільшенні вмісту Sb_2S_3 (20 – 45 моль. %) відбувається зміщення краю оптичного поглинання в сторону більших довжин хвиль, що призводить до зменшення ширини забороненої зони досліджених склоподібних сплавів. Додавання (1 – 3) моль. % Er_2S_3 не призводить до значних змін E_g та при подальшому збільшенні цієї компоненти зафіксовано деяке зростання ($\sim 0,04$ eV) енергії забороненої зони.

Низькі значення коефіцієнта поглинання в діапазоні 1000 – 2000 нм свідчать про хороші перспективи використання досліджених стекол в оптоелектронній техніці, що працює близькому інфрачервоному діапазоні.

Ключові слова: оптичне поглинання, склоподібні сплави, халькогенідний напівпровідник, ширина забороненої зони, ербій, неодимій.

Tetiana YATSYNIUK

Postgraduate Student at the Department of Experimental Physics, Information and Educational Technologies, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7288-3189>

SCOPUS AUTHOR ID: 57658704300

Volodymyr HALYAN

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Experimental Physics, Information and Educational Technologies, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0066-7174>

SCOPUS AUTHOR ID: 35422525700

Andrii KEVSHYN

Student at the Department of Experimental Physics, Information and Educational Technologies, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3581-8852>

SCOPUS AUTHOR ID: 35422272900

Hanna SHAVAROVA

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Experimental Physics, Information and Educational Technologies, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0251-9327>

SCOPUS AUTHOR ID: 6506685303

Vitaly ARTYUKH

Postgraduate Student at the Educational and Scientific Institute of Physics and Technology, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7785-6072>

Bohdan SVITLIKOVSKIY

Postgraduate Student at the Educational and Scientific Institute of Physics and Technology, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-0113-3726>

To cite this article: Yatsyniuk, T., Halyan, V., Kevshyn, A., Shavarova, G., Artyuh, V., Svilikovskiy, B. (2025). Optichne poglinannya stekol sistemi Ga_2S_3 - GeS_2 - Sb_2S_3 legovanih Er ta Nd [Optical absorption classes in the Ga_2S_3 - GeS_2 - Sb_2S_3 system doped with Er and Nd]. *Physics and Educational Technology*, 1, 120–127, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-16>

OPTICAL ABSORPTION OF GLASSES IN THE Ga_2S_3 - GeS_2 - Sb_2S_3 SYSTEM DOPED WITH Er AND Nd

Optical absorption in chalcogenide semiconductors is important from both fundamental and applied perspectives. The analysis of optical absorption spectra in chalcogenide glassy alloys helps reveal the electronic structure and the nature of chemical bonds in these materials, contributing to a deeper understanding of the physics of disordered systems. Studies of the optical properties of chalcogenide glasses assist in the development of new materials with improved characteristics and help identify defects and impurities that may influence their optical and photoelectrical properties.

The optical absorption spectra of glasses with compositions of 20 mol.% Ga_2S_3 – 60 mol.% GeS_2 – 20 mol.% Sb_2S_3 and 25 mol.% Ga_2S_3 – 30 mol.% GeS_2 – 45 mol.% Sb_2S_3 simultaneously doped with Er and Nd were studied in the range of 550 – 2000 nm at room temperature. The edge of optical absorption of the glasses is located around 600 nm and does not undergo significant changes upon doping with Er and Nd. Narrow absorption bands were registered with maxima at 655, 755, 810, 885, 980, and 1540 nm, corresponding to transitions in the f-shells of Er^{3+} and Nd^{3+} ions.

From the graph defining the edge of optical absorption, the optical band gap of the glasses was estimated by extrapolating the linear portion of the experimental curve to the intersection with the abscissa axis. It was found that with an increase in the Sb_2S_3 content (from 20 to 45 mol.%), the optical absorption edge shifts towards longer wavelengths, resulting in a decrease in the band gap of the studied glassy alloys. The addition of (1 – 3) mol.% Er_2S_3 does not lead to significant changes in the band gap, and with further increases in this component, a slight increase (~ 0.04 eV) in the band gap was recorded.

The low values of the absorption coefficient in the 1000 – 2000 nm range indicate promising prospects for the use of these glasses in optoelectronic devices operating in the near-infrared range.

Key words: optical absorption, glassy alloys, chalcogenide semiconductor, band gap, erbium, neodymium.

Вступ. Дослідження спектрів оптичного поглинання в халькогенідних склоподібних сплавах є важливим чинником для розуміння діапазону прозорості та природи оптичних центрів, які впливають на їх оптичні властивості. Сульфуровмісні стекла застосовують у фотоніці, лазерних технологіях, оптичних підсилювачах та сенсорах завдяки своїй здатності до ефективного поглинання / пропускання світла у видимому та близькому інфрачервоному діапазонах (Eggleton, 2011; Нео, 2014; Chen, 2011). Крім того, дослідження спектрів поглинання сплавів (Кевшин 2010; Галян 2016) дозволяє визначити енергетичні рівні, положення яких може значно вплинути на їх оптичні та електричні властивості, що є важливою інформацією при конструюванні нових оптоелектронних пристроїв.

Результати досліджень. Досліджено спектри оптичного поглинання стекел 20 моль. % Ga_2S_3 – 60 моль. % GeS_2 – 20 моль. % Sb_2S_3 одночасно легованих Er та Nd в діапазоні 550 – 2000 нм при кімнатній температурі (рис. 1). Край оптичного поглинання стекел знаходиться близько 600 нм і не зазнає суттєвих змін при їх легуванні Er та Nd. Зразки демонструють високу прозорість в спектральному

діапазоні 700 – 2000 нм. Водночас, зареєстровано вузькі смуги поглинання з максимумами 655, 755, 810, 885, 980 і 1540 нм, що відповідають переходам в f-оболонці іонів Er^{3+} і Nd^{3+} (рис. 1). Із збільшенням вмісту ербію зростає інтенсивність домішкових смуг поглинання, які пов'язані з іонами Er^{3+} . В таблиці 1. подано максимумами поглинання, переходи в f-оболонці та іони, які їм відповідають. Єдина смуга поглинання із максимумом 810 нм є спільною для іонів ербію та неодимію.

Енергетичний спектр електронів у склоподібних напівпровідниках характеризується областями із високою та низькою густиною електронних станів, що пов'язано з відсутністю далекого порядку у їх структурі. Тому зонна структура стекел відрізняється від кристалічних напівпровідників і містить додаткові дозволені електронні стани. Густина цих станів зменшується у глибину забороненої зони (рис. 2), внаслідок чого виникають «хвости» густини станів.

Якщо вважати залежність густини станів у «хвостах» дозволених енергетичних зон від енергії лінійною (Студеняк, 2021, с. 272), отримаємо переходи носіїв із делокалізованих станів у валентиній зоні в локалізовані стани в зоні провідності або з локалізованих станів

Таблиця 1

Максимуми поглинання в іонах Er^{3+} , Nd^{3+} та відповідні їм переходи

Іон	655, нм	755, нм	810, нм	885, нм	980, нм	1540, нм
Er^{3+}	$^4\text{I}_{15/2} \rightarrow ^4\text{F}_{9/2}$		$^4\text{I}_{15/2} \rightarrow ^4\text{I}_{9/2}$		$^4\text{I}_{15/2} \rightarrow ^4\text{I}_{11/2}$	$^4\text{I}_{15/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$
Nd^{3+}		$^4\text{I}_{9/2} \rightarrow ^4\text{F}_{7/2}, ^4\text{S}_{3/2}$	$^4\text{I}_{9/2} \rightarrow ^4\text{F}_{5/2}, ^2\text{H}_{9/2}$	$^4\text{I}_{9/2} \rightarrow ^4\text{F}_{3/2}$		

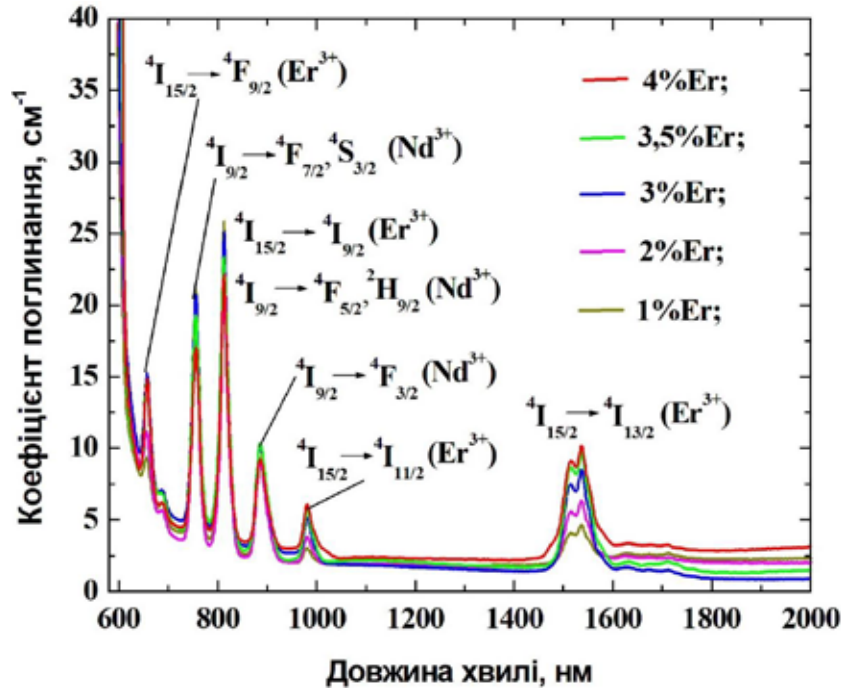


Рис. 1. Спектр поглинання стекл 20 моль. % Ga_2S_3 – 60 моль. % GeS_2 – 20 моль. % Sb_2S_3 : 1-4 % Er; 2 % Nd

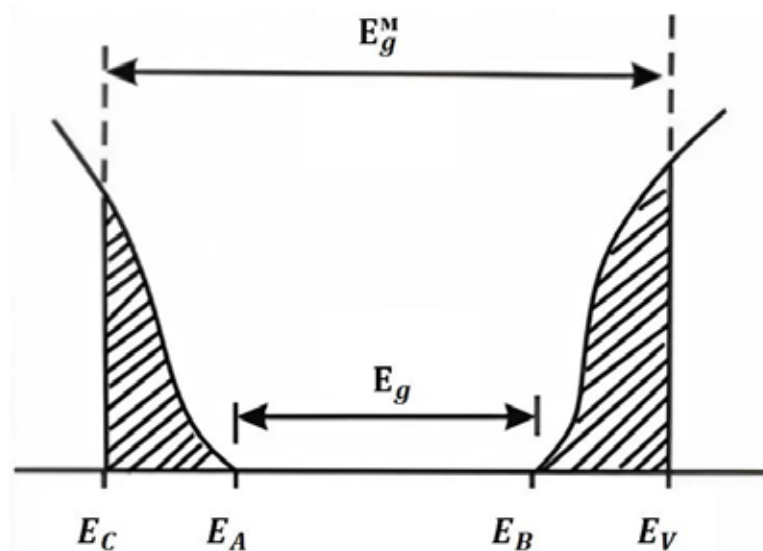


Рис. 2. Модель зонної структури аморфних напівпровідників (Mott, 1971, р. 437). E_g – ширина забороненої зони, визначена за відстанню між локалізованими станами; E_g^M – ширина забороненої зони, визначена за краєм рухливості носіїв заряду; $E_C - E_A = E_B - E_V = E_{\text{lok}}$ – ширина локалізованих станів в хвостах енергетичних зон.

у «хвості» валентної зони в зону провідності делокалізованих станів. Екстраполюючи лінійну ділянку (рис. 1) експериментальної кривої $(\alpha \cdot hv)^{1/2} \sim hv$ до перетину з віссю абсцис можемо оцінити оптичну ширину забороненої зони стекл. На рис. 3 подано край оптичного поглинання досліджених склоподібних сплавів. Зауважимо, що переходи носіїв заряду між «хвостами» відповідних зон не враховується.

Як видно із рис. 3, при вмісті (1 – 3) % Er лінійна ділянка краю оптичного поглинання паралельно зміщується в область менших довжин хвиль. При подальшому збільшенні концентрації ербію (3,5, 4 % Er) змінюється нахил краю поглинання, внаслідок чого оптична ширина забороненої зони зростає.

Для того, щоб дослідити вплив компоненти Sb_2S_3 на оптичні властивості досліджуваної системи, були синтезовані склоподібні сплави 25 моль. % Ga_2S_3 – 30 моль. % GeS_2 – 45 моль. % Sb_2S_3 : (1 – 4) % Er; 2 % Nd. Для цієї системи проведено дослідження спектрів оптичного поглинання в діапазоні 600 – 2000 нм (рис. 4). Зафіксовано вузькі смуги поглинання, що відповідають переходам в f-оболонках (відповідні переходи позначено на рисунку) іонів ербію та

неодимію. При збільшенні вмісту Sb_2S_3 (20 – 45 моль. %) відбулось зміщення краю оптичного поглинання в сторону більших довжин хвиль. Крім того, порівнюючи рис. 1 та рис. 4, видно збільшення коефіцієнта поглинання (при 2000 нм) від $1\text{--}3\text{ см}^{-1}$ до $6\text{--}8\text{ см}^{-1}$ при зростанні компоненти Sb_2S_3 . За результатами досліджень вибрано область біля краю оптичного поглинання і побудовано графіки залежності $(\alpha \cdot hv)^{1/2}$ від hv для зразків із різним вмістом ербію (рис. 5). Якщо екстраполювати лінійну частину графіка прямою до перетину з віссю hv можемо

визначити оптичну ширину забороненої зони та подати в енергетичних одиницях eV (рис. 6). При збільшенні з 20 моль. % Sb_2S_3 до 45 моль. % Sb_2S_3 ширина забороненої зони зменшується на $\sim 0,3\text{ eV}$, що може бути пов'язано із структурною трансформацією склоподібних сплавів. Додавання (1 – 3) моль. % Er_2S_3 не призводить до значних змін E_g та при подальшому збільшенні цієї компоненти фіксуємо деяке зростання енергії забороненої зони. Введення рідкісноземельних металів в аморфне середовище покращує люмінесцентні властивості (Lozano, 2013; Halyan, 2013; Shen 2010), але сприяє його кристалізації (Pan, 2022, p.100998).

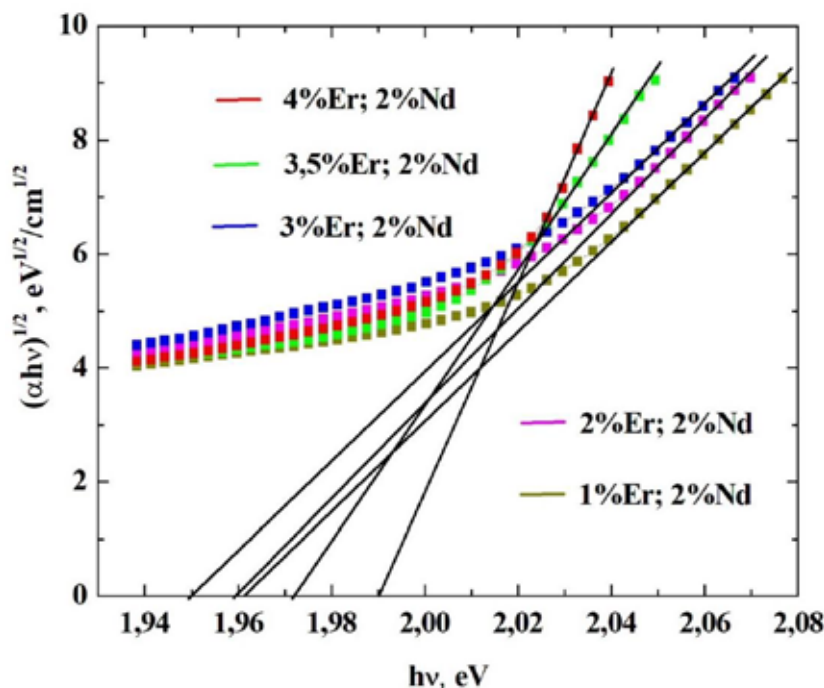


Рис. 3. Край оптичного поглинання стекл 20 mol. % Ga_2S_3 – 60 mol. % GeS_2 – 20 mol. % Sb_2S_3 : (1 – 4) % Er; 2 % Nd

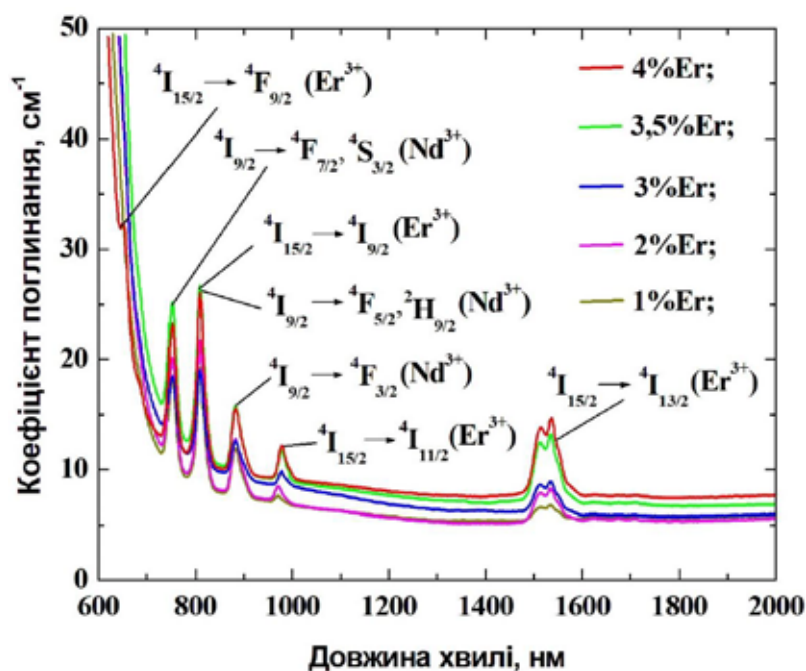


Рис. 4. Спектр поглинання стекол 25 моль. % Ga_2S_3 – 30 моль. % GeS_2 – 45 моль. % Sb_2S_3 : 1-4 % Er; 2 % Nd

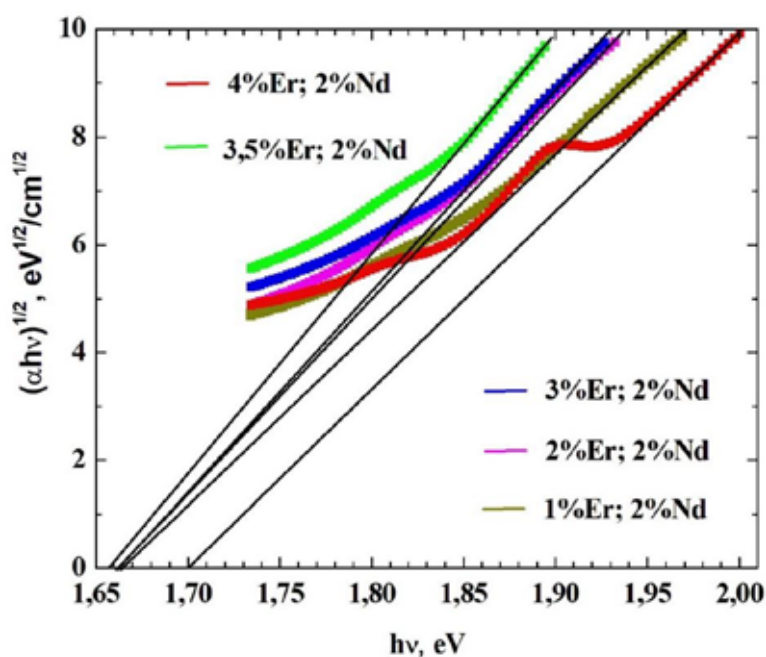


Рис. 5. Край оптичного поглинання стекол 25 моль. % Ga_2S_3 – 30 моль. % GeS_2 – 45 моль. % Sb_2S_3 : 1-4 % Er; 2 % Nd

Тому при великих вмістах Er_2S_3 у склаутворюючій матриці можуть виникати мікро- чи нанонеоднорідності, що впливатиме на оптичні властивості халькогенідних сплавів і, зокрема, на ширину забороненої зони.

Висновки. Досліджено спектри оптичного поглинання халькогенідних склоподібних

сплавів 20 моль. % Ga_2S_3 – 60 моль. % GeS_2 – 20 моль. % Sb_2S_3 та 25 моль. % Ga_2S_3 – 30 моль. % GeS_2 – 45 моль. % Sb_2S_3 , які були одночасно леговані Er та Nd. Екстраполяцією лінійної ділянки експериментальної кривої $(\alpha \cdot hv)^{1/2} \sim hv$ до перетину з віссю абсцис оцінено оптичну ширину забороненої зони стекол.

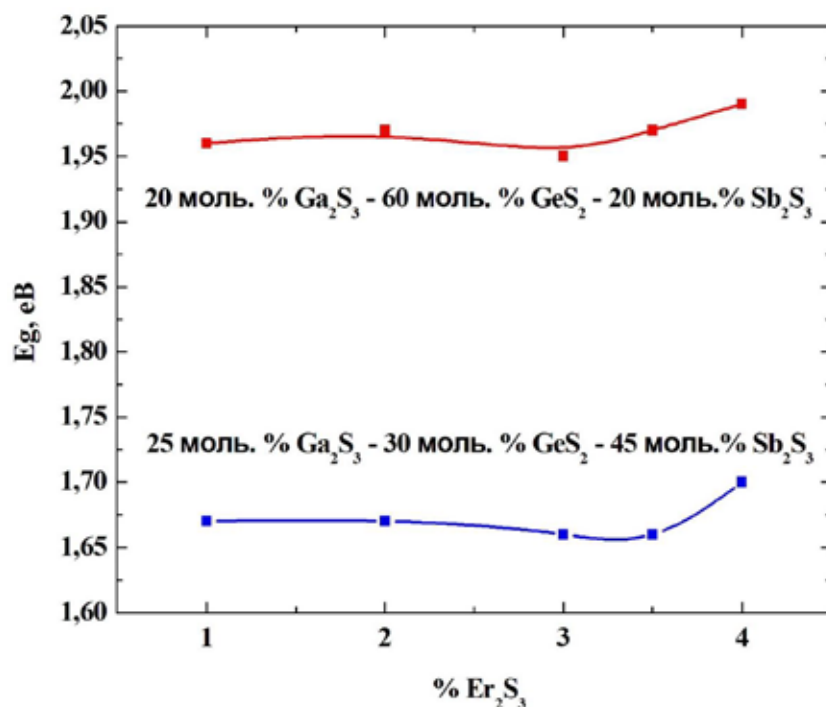


Рис. 6. Концентраційна залежність ширини забороненої зони стекол системи $\text{Ga}_2\text{S}_3 - \text{GeS}_2 - \text{Sb}_2\text{S}_3$

При збільшенні мол.% Sb_2S_3 ширина забороненої зони стекол зменшується на $\sim 0,3$ еВ, що може бути пов'язано із структурною трансформацією склоподібних сплавів. Додавання (1 – 3)

моль.% Er_2S_3 не призводить до значних змін E_g та при подальшому збільшенні цієї компоненти фіксуємо деяке зростання ($\sim 0,04$ еВ) енергії забороненої зони.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Eggleton B. J., Luther-Davies B., Richardson K. Chalcogenide photonics. *Nature Photonics* 2011. Vol. 5, 141–148.
2. Heo J., Chung W.J., Adam J.-C., Zhang X. Rare-earth-doped chalcogenide glass for lasers and amplifiers. *Chalcogenide Glasses. Preparation, Properties and Applications*. Cambridge, UK : Woodhead Publishing Limited 2014, p. 347–378.
3. Chen P. Ailavajhala M., Mitkova M. et al. Structural Study of Ag-Ge-S Solid Electrolyte Glass System for Resistive Radiation Sensing. *IEEE. Microelectronics and Electron Devices* 2011. 1–4.
4. Кевшин А.Г., Галян В.В., Давидюк Х.Є., Парасюк О.В., Мазурець І.І. Концентраційна залежність оптичних властивостей склоподібних сплавів у системі $\text{HgS}-\text{Ga}_2\text{S}_3-\text{GeS}_2$. *Фізика та хімія скла*. 2010, № 36, с. 27–32.
5. Галян В. В., Кевшин А. Г., Іващенко І. А., Шевчук М. В. Вплив заміни S на Se на спектри оптичного поглинання склоподібних сплавів $\text{Ag}_{1,6}\text{Ga}_{1,6}\text{Ge}_{31,2}\text{S}_{61,6-x}\text{Se}_x$. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2016. Т. 17. № 3. с. 342–346.
6. Mott N.F. Davis E.A. *Electronic Processes in Non-Crystalline Materials*. Oxford: Clarendon-Press. 1971. p.437.
7. Студеняк І.П., Сусліков Л.М. Оптичні властивості кристалічних та некристалічних матеріалів. *навчальний посібник*. Ужгород: Видавництво УжНУ "Говерла". 2021. 272 с.
8. Lozano W., Ara C. B., Ledemi Y., Messaddeq Y. Upconversion luminescence in Er^{3+} doped $\text{Ga}_{10}\text{Ge}_{25}\text{S}_{65}$ glass and glass-ceramic excited in the near-infrared. *J. Appl. Phys.* 2013. Vol.113. p. 083520-1–083520-6.
9. Halyan V. V., Strelchuk V. V., Yukhymchuk V. O. Role of structural ordering on optical properties of the glasses $\text{Ag}_{0,05}\text{Ga}_{0,05}\text{Ge}_{0,95}\text{S}_2-\text{Er}_2\text{S}_3$. *Physica B Condens. Matter*. 2013. Vol. 411. № 15. p. 35–39.
10. Shen X., Nie Q., Xu T., Dai Sh., Wang X. Temperature dependence of upconversion luminescence in erbium-doped tellurite glasses. *J. Lumin.* 2010. Vol. 130. p.1353–1356.
11. Pan Q., Yang D., Dong G., Qiu J., Yang Z. Nanocrystal-in-glass composite (NGC): A powerful pathway from nanocrystals to advanced optical materials. *Prog. Mater. Sci.* 2022. Vol. 130. p. 100998.

REFERENCES:

1. Eggleton, B. J., Luther-Davies, B., & Richardson, K. (2011). Chalcogenide photonics. *Nature Photonics*, Vol. 5, 141–148.

2. Heo, J., Chung, W.J. J.-C. Adam, X. Zhang (2014). Rare-earth-doped chalcogenide glass for lasers and amplifiers. *Chalcogenide Glasses. Preparation, Properties and Applications*. Cambridge, UK : Woodhead Publishing Limited., 347–378.
3. Chen, P., Ailavajhala, M., & Mitkova, M. (2011). Structural Study of Ag-Ge-S Solid Electrolyte Glass System for Resistive Radiation Sensing. *Microelectronics and Electron Devices*, 1–4.
4. Kevshyn, A. H., Halyan, V. V., Davydyuk, H. Ye., Parasyuk, O. V., & Mazurets, I. I. (2010). Kонтсентратиіна залежність оптичних властивостей склоподібних сплавів у системі $\text{HgS}-\text{Ga}_2\text{S}_3-\text{GeS}_2$ [Concentration dependence of the optical properties of glassy alloys in the $\text{HgS}-\text{Ga}_2\text{S}_3-\text{GeS}_2$ system. *Фізика та хімія скла. – Glass Phys. Chem.*, Vol. 36, 27–32. [in Ukrainian]
5. Halyan, V. V., Kevshin, A. G., Ivashchenko, I. A., & Shevchuk, M. V. (2016). Вплив заміни S на Se на спектри оптичного поглинання склоподібних сплавів $\text{Ag}_{1,6}\text{Ga}_{1,6}\text{Ge}_{31,2}\text{S}_{61,6-x}\text{Se}_x$ [The effect of replacing S with Se on the optical absorption spectra of glassy alloys $\text{Ag}_{1,6}\text{Ga}_{1,6}\text{Ge}_{31,2}\text{S}_{61,6-x}\text{Se}_x$]. *Фізика і хімія твердого тіла. -Physics and Chemistry of Solids*, Vol.17, 3, 342–346. [in Ukrainian]
6. Mott, N.F., & Davis, E.A. (1971). Electronic Processes in Non-Crystalline Materials. *Oxford: Clarendon-Press*, 437.
7. Studenyak, I.P., & Suslikov, L.M. (2021). Оптичні властивості кристалічних та некристалічних матеріалів [Optical properties of crystalline and non-crystalline materials] *Ужгород: Wydawnictwo UzhNU "Hoverla"- Uzhhorod: Publishing house of UzhNU "Hoverla"*, 272 [in Ukrainian]
8. Lozano, W., Ara, C. B., Ledemi, Y., & Messaddeq, Y. (2013). Upconversion luminescence in Er^{3+} doped $\text{Ga}_{10}\text{Ge}_{25}\text{S}_{65}$ glass and glass-ceramic excited in the near-infrared. *J. Appl. Phys.* Vol.113, 083520-1–083520-6.
9. Halyan, V. V., Strelchuk, V. V., & Yukhymchuk, V. O. (2013). Role of structural ordering on optical properties of the glasses $\text{Ag}_{0,05}\text{Ga}_{0,05}\text{Ge}_{0,95}\text{S}_2-\text{Er}_2\text{S}_3$. *Physica B Condens. Matter*, Vol. 411, 15, 35–39.
10. Shen, X., Nie, Q., Xu, T., Dai, Sh., & Wang, X. (2010). Temperature dependence of upconversion luminescence in erbium-doped tellurite glasses. *J. Lumin.* Vol. 130, 1353–1356.
11. Pan, Q., Yang, D., Dong, G., Qiu, J., & Yang, Z. (2022). Nanocrystal-in-glass composite (NGC): A powerful pathway from nanocrystals to advanced optical materials. *Prog. Mater. Sci.*, Vol. 130, 100998.