

УДК 621.315.592

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2023-4-4>

Тетяна ЯЦИНЮК

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

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

SCOPUS-AUTHORID: 57658704300

Андрій КЕВШИН

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

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

SCOPUS-AUTHORID: 35422272900

Володимир ГАЛЯН

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

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

SCOPUS-AUTHORID: 35422525700

Інна ІВАЩЕНКО

кандидат хімічних наук, професор кафедри хімії та технологій, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9724-0737>

SCOPUS-AUTHORID: 7003831212

Віталій АРТЮХ

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

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

Орися БЕРЕЗНЮК

аспірант кафедри хімії та технологій, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі 13, м. Луцьк, Україна, 43025

SCOPUS-AUTHORID: 57759248200

Анастасія ТАРАСЕНКО

студентка кафедри експериментальної фізики, інформаційних та освітніх технологій, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі 13, м. Луцьк, Україна, 43025

Бібліографічний опис статті: Яцинюк, Т., Кевшин, А., Галян, В., Іващенко, І., Артюх, В., Березнюк, О., Тарасенко, А. (2023) Люмінесцентні властивості стекол $\text{Ag}_2\text{S-GeS}_2$ та $\text{Ag}_2\text{S-GeS}_2\text{-Sb}_2\text{S}_3$ легованих ербієм та неодимієм. *Фізика та освітні технології*, 4, 28–34, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2023-4-4>

ЛЮМІНЕСЦЕНТНІ ВЛАСТИВОСТІ СТЕКОЛ $\text{Ag}_2\text{S-GeS}_2$ ТА $\text{Ag}_2\text{S-GeS}_2\text{-Sb}_2\text{S}_3$ ЛЕГОВАНИХ ЕРБІЄМ ТА НЕОДИМІЄМ

Халькогенідні стекла леговані рідкісноземельними металами володіють унікальними властивостями. Їх використовують як світловипромінюючі середовища у лазерній техніці, перемикачі, оптичні сенсори, для конструювання далекомірів у військовій техніці, моніторингу забруднення повітря тощо. Сульфуровмісні стекла, що досліджені в статті, характеризуються прозорістю у видимій ділянці спектра, а також ближньому та середньому спектральному діапазоні. Увівши в такі широкозонні напівпровідники домішки рідкісноземельних металів, можна отримати матеріали із заданими оптичними властивостями, зокрема із високим квантовим виходом випромінювання. У представленій роботі подано компонентний склад зразків, у матрицю яких можна було ввести 2% Nd_2S_3 та (1-4)% Er_2S_3 .

Розчин-розплавним методом синтезовано стекла $\text{Ag}_2\text{S-GeS}_2\text{-Nd}_2\text{S}_3\text{-Er}_2\text{S}_3$ та $\text{Ag}_2\text{S-GeS}_2\text{-Sb}_2\text{S}_3\text{-Nd}_2\text{S}_3\text{-Er}_2\text{S}_3$. При збудженні зразків за допомогою лазера з енергією 1,54 еВ зафіксовано смуги фотолюмінесценції у ближньому інфрачервоному діапазоні спектра. Максимуми випромінювання 1,16 та 0,92 еВ відповідають переходам ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ та ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ в f-оболонці іонів Nd^{3+} . Фотолюмінесценцію, яку пов'язуємо з іонами ербію, не зафіксовано. Положення та форма максимумів не змінюється при зміні концентрації рідкісноземельних металів. Збільшення вмісту ербію призводить до зменшення інтенсивності максимумів випромінювання. Цей ефект пов'язуємо із процесами обміну енергією між іонами Nd^{3+} та Er^{3+} при збільшенні концентрації останнього. На основі діаграми енергетичних рівнів в іонах неодимію обговорюється механізм збудження та випромінювання в іонах Nd^{3+} .

Виникнення інтенсивних смуг фотолюмінесценції в стеклах систем $\text{Ag}_2\text{S-GeS}_2$ та $\text{Ag}_2\text{S-GeS}_2\text{-Sb}_2\text{S}_3$ легованих ербієм та неодимієм може бути використано для конструювання лазерів у близькому інфрачервоному діапазоні спектра.

Ключові слова: халькогенідне скло, фотолюмінесценція, ербій, неодимій, збуджений стан, релаксація.

Tetiana YATSYNIUK

Graduate student 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/0000-0001-7288-3189>

SCOPUS-AUTHOR ID: 57658704300

Andrii KEVSHYN

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor 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/0000-0002-3581-8852>

SCOPUS-AUTHOR ID: 35422272900

Volodymyr HALIAN

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

Inna IVASHCHENKO

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9724-0737>

SCOPUS-AUTHOR ID: 7003831212

Vitalii ARTIUKH

graduate student of the educational and scientific physical and technological institute, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

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

Orysia BEREZNIUK

graduate student of the Department of Chemistry and Technologies, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

SCOPUS-AUTHOR ID: 57759248200

Anastasia TARASENKO

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

To cite this article: Yatsyniuk, T., Kevshin, A., Halian, V., Ivashchenko, I., Artiukh, V., Berezniuk, O., Tarasenko, A. (2023) Luminescent properties of glass $\text{Ag}_2\text{S-GeS}_2$ and $\text{Ag}_2\text{S-GeS}_2\text{-Sb}_2\text{S}_3$ doped with erbium and neodymium. *Physics and educational technologies*, 4, 28–34, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2023-4-4>

LUMINESCENT PROPERTIES OF GLASS $\text{Ag}_2\text{S-GeS}_2$ AND $\text{Ag}_2\text{S-GeS}_2\text{-Sb}_2\text{S}_3$ DOPED WITH ERBIUM AND NEODYMIUM

Chalcogenide glasses doped with rare earth metals have unique properties. They are used as light-emitting media in laser technology, switches, optical sensors, for the construction of rangefinders in military equipment, air pollution monitoring, etc. The sulfur-containing glasses studied in the article are characterized by transparency in the visible part of the spectrum, as well as in the near and middle spectral range. By introducing rare earth metals impurities into such wide-gap semiconductors, it is possible to obtain materials with specified optical properties, in particular, with a high quantum yield of radiation. In the presented work, the composition of the samples, into the glass matrix of which 2% Nd_2S_3 and (1-4)% Er_2S_3 could be introduced, is given.

Glasses $\text{Ag}_2\text{S-GeS}_2\text{-Nd}_2\text{S}_3\text{-Er}_2\text{S}_3$ and $\text{Ag}_2\text{S-GeS}_2\text{-Sb}_2\text{S}_3\text{-Nd}_2\text{S}_3\text{-Er}_2\text{S}_3$ were synthesized by the solution-melt method. Photoluminescence bands in the near-infrared range of the spectrum were recorded when the samples were excited using a laser with an energy of 1.54 eV. The emission maxima of 1.16 and 0.92 eV correspond to transitions $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ and $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ in f-shells of ions Nd^{3+} . Photoluminescence, which is associated with erbium ions, has not been recorded. The position and shape of the maxima does not change when the concentration of rare earth metals changes. An increase in the erbium content leads to a decrease in the intensity of the radiation maxima. We attribute this effect to the processes of energy transfer between Nd^{3+} and Er^{3+} ions when the concentration of the latter increases. Based on the diagram of energy levels in neodymium ions, the mechanism of excitation and emission in Nd^{3+} ions is discussed.

The emergence of intense photoluminescence bands in the $\text{Ag}_2\text{S-GeS}_2$ and $\text{Ag}_2\text{S-GeS}_2\text{-Sb}_2\text{S}_3$ systems glasses doped with erbium and neodymium can be used to design lasers in the near-infrared range of the spectrum.

Key words: Chalcogenide glass, photoluminescence, erbium, neodymium, excited state, relaxation.

Вступ. Халькогенідні стекла, леговані тривалентними рідкісноземельними іонами металів (РЗМ), широко досліджуються завдяки їхнім унікальним властивостям електронної структури. Вони перспективні для застосування як оптичні сенсори, активні середовища у лазерній техніці, телекомунікаціях та для біохімічних досліджень [1–3]. Сульфідні скла характеризуються високим показником заломлення (1,8–2,5), мають широкий інтервал прозорості у видимому та інфрачервоному спектральних діапазонах, а також проявляють нелінійно-оптичні властивості [4, 5, 8].

Люмінесцентні властивості в стеклах на основі сульфідних матриць проявляються лише при низьких температурах (менше 100 К). Це суттєво обмежує їх використання

в оптоелектронній техніці. Тому в склоутворюючу матрицю вводять іони РЗМ, які є оптично активними центрами випромінювання та проявляють хороші люмінесцентні властивості завдяки переходам в f-оболонці [9].

Синтез стекол, методика та техніка експерименту. Синтез проводили у вакуумованих до залишкового тиску $1,33 \times 10^{-2}$ Па кварцових контейнерах. Елементарні речовини відповідного складу, поміщені в кварцові контейнери, нагрівали зі швидкістю 20 К/год до 1100 К та витримували впродовж 24 год за температур 670 та 870 К для зв'язування сірки. При максимальній температурі зразки витримували 10 год. Після чого в режимі швидкого охолодження ампули зі сплавами гартували у 25-відсотковому водному розчині натрій хлориду

з подрібненим льодом [6]. Склоподібний стан зразків контролювався за результатами досліджень рентгенофазового аналізу (ДРОН 4-13, CuK α -випромінювання).

Дослідження спектрів фотолюмінесценції (ФЛ) проводили на базі монохроматора МДР-204 із використанням фотоприймача PbS. Збудження випромінювання здійснювалось із тієї ж поверхні зразка, що і приймання сигналу ФЛ.

Результати досліджень та обговорення.

Компонентний склад синтезованих стекел подано в таблиці 1. Ми дослідили спектри ФЛ в інфрачервоному діапазоні 1000-1500 нм (рис. 1, 2).

Збудження ФЛ проводили діодним лазером із максимальною енергією випромінювання 1,54eV та потужністю 400 мВт.

Спектри характеризується двома максимумами випромінювання – 1,16 eV, та 0,92 eV., які відповідають переходам $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ та $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ в іонах Nd $^{3+}$, відповідно. Зауважимо, що додавання компоненти Sb $_2$ S $_3$ призводить до зменшення інтенсивності ФЛ.

На рис. 3 подано діаграму енергетичних рівнів в іонах Nd $^{3+}$ та відповідні переходи. При збудженні зразків світлом із енергією випромінювання 1,54 eV іони неодимію переходять зі стану $^4I_{9/2}$ в стан $^4F_{5/2}$. Після безвипромінювальної релаксації зі стану $^4F_{5/2}$ в стан $^4F_{3/2}$ іони

Таблиця 1

Компонентний склад досліджених зразків

Система	Ag $_2$ S	GeS $_2$	Sb $_2$ S $_3$	Nd $_2$ S $_3$	Er $_2$ S $_3$
Ag $_2$ S-GeS $_2$ -Nd $_2$ S $_3$ -Er $_2$ S $_3$	50	47	0	2	1
	50	47	0	2	2
	50	45	0	2	3
	50	44	0	2	4
Ag $_2$ S-GeS $_2$ -Sb $_2$ S $_3$ -Nd $_2$ S $_3$ -Er $_2$ S $_3$	20	60	17	2	1
	20	60	16	2	2
	20	60	15	2	3
	20	60	14	2	4

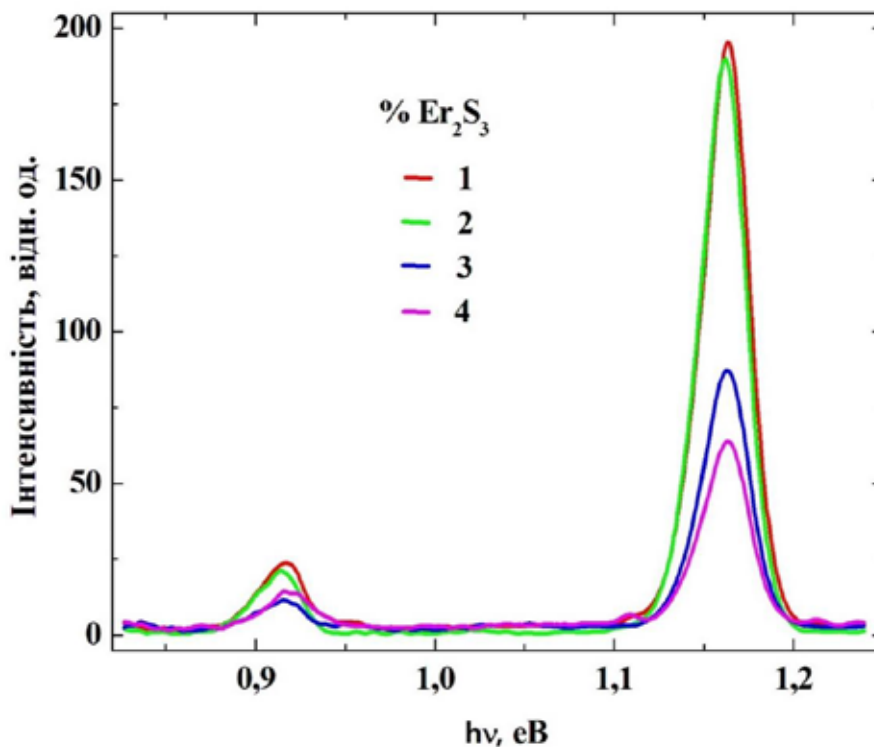


Рис. 1. Спектри ФЛ стекел Ag $_2$ S-GeS $_2$ -Nd $_2$ S $_3$ -Er $_2$ S $_3$

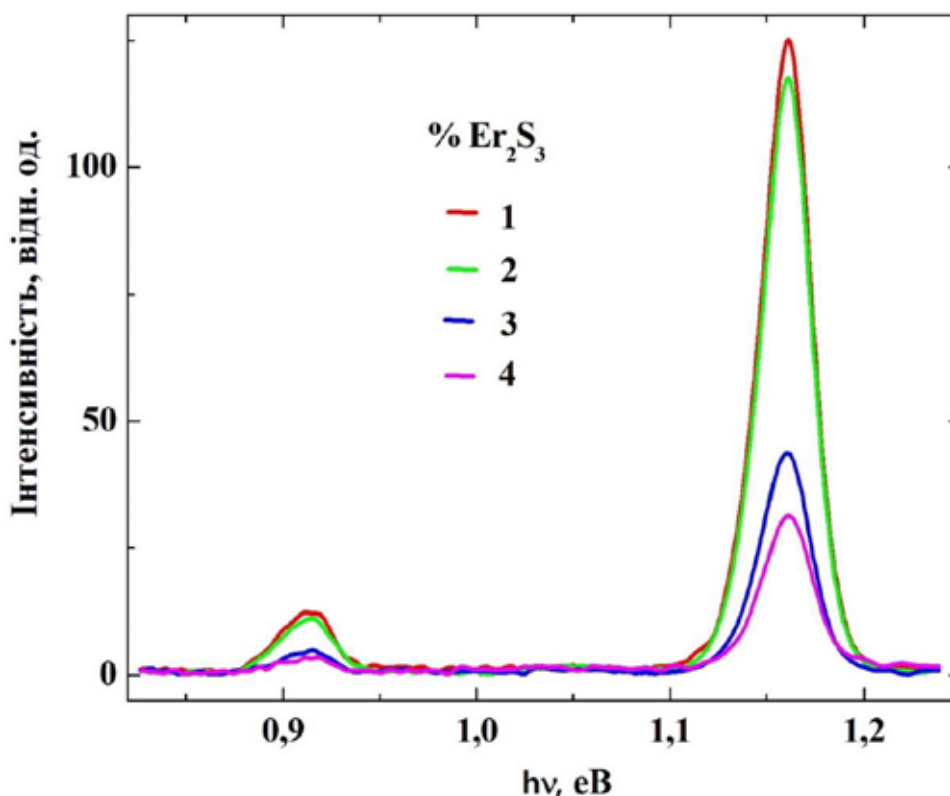


Рис. 2. Спектри ФЛ стекол $\text{Ag}_2\text{S-GeS}_2\text{-Sb}_2\text{S}_3\text{-Nd}_2\text{S}_3\text{-Er}_2\text{S}_3$

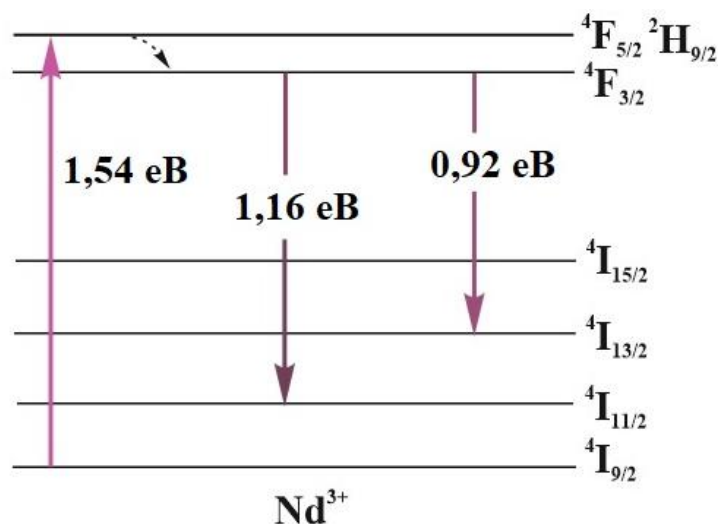


Рис. 3. Діаграма енергетичних рівнів в іоні Nd^{3+}

Nd^{3+} випромінюють інтенсивну смугу ФЛ із максимумом 1,16 eV, переходячи в стан $^4\text{I}_{11/2}$. Крім того, перехід іонів зі стану $^4\text{F}_{3/2}$ в стан $^4\text{I}_{13/2}$ супроводжується випромінюванням із енергією 0,92 eV.

Зауважимо, що в експериментальних дослідженнях не зафіксовано ФЛ, яка

пов'язана з іонами Er^{3+} . Збільшення вмісту ербію призводить до зменшення інтенсивності смуг ФЛ, які пов'язані з іонами Nd^{3+} . Це обумовлено тим, що при вищій концентрації ербію сусідні іони Nd^{3+} та Er^{3+} можуть обмінюватись енергією внаслідок меншій відстані між ними [7]. Отже, при збільшенні

концентрації ербію відбувається енергетичний трансфер від іонів Nd^{3+} , які знаходяться в стані ${}^4\text{F}_{3/2}$ до іонів Er^{3+} , що знаходяться в стані ${}^4\text{I}_{15/2}$. У результаті такої взаємодії іони ербію переходять в стан ${}^4\text{I}_{11/2}$, а іони неодимію в стан ${}^4\text{I}_{9/2}$. Відсутність смуг ФЛ, які пов'язані з іонами ербію в дослідженому спектральному діапазоні, обумовлено домінуванням без випромінюючих переходів в іонах Er^{3+} в стеклах $\text{Ag}_2\text{S-GeS}_2$ та $\text{Ag}_2\text{S-GeS}_2\text{-Sb}_2\text{S}_3$, які леговані неодимом та ербієм.

Висновки. Синтезовано халькогенідні скло-подібні сплави $\text{Ag}_2\text{S-GeS}_2$ та $\text{Ag}_2\text{S-GeS}_2\text{-Sb}_2\text{S}_3$ із додаванням 2% Nd_2S_3 та (1-4)% Er_2S_3 . Збуджуючи зразки лазером із енергією 1,54 еВ, зафіксовано смуги ФЛ із максимумами 1,16 та 0,92 еВ. При збільшенні вмісту ербію інтенсивність ФЛ зменшується, що пов'язано із енергетичним трансфером між сусідніми іонами Er^{3+} та Nd^{3+} . Механізм випромінювання проілюстровано на основі діаграми енергетичних переходів в іонах Nd^{3+} .

ЛІТЕРАТУРА:

1. Кумар К. Сильне синє випромінювання іонів Pr^{3+} через процес передачі енергії від Nd^{3+} до Pr^{3+} через Yb^{3+} у телуритовому склі / К. Кумар, С.Б. Рай, А. Рай // *Спектрохімія Акта А.* – 2008 – № 71(2). – С. 508–512.
2. Нурхафіза Х. $\text{Er}^{3+}:\text{Nd}^{3+}$ залежні від концентрації спектральні особливості аморфного середовища літій-ніобат-телурит / Х. Нурхафіза, М.С. Рохані, С.К. Гошал // *Журнал некристалічних твердих речовин.* – 2016. – № 443. – С. 23–32.
3. Кітик І. В. Особливості NIR та видимої люмінесценції легованого ербієм $\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-La}_2\text{S}_3$ / І. В. Кітик, В. В. Галян, В.О. Юхимчук, В.В. Стрельчук, І.А. Іващенко, Я. Жидачевський та інші // *Журнал некристалічних твердих речовин.* – 2018. – Вип. 498. – С. 380–385.
4. Хагерл З. Спектри люмінесценції та оптичні властивості стекел $\text{TeO}_2\text{-WO}_3\text{-Li}_2\text{O}$, легованих рідкоземельними іонами Nd, Sm та Er / З. Хагерл, Р. Ель-Маллавані, А. Булу // *Фізика Б* – 2011. – № 406. – С. 972–980.
5. Ель Наггар А.М. Дослідження нелінійно-оптичних властивостей скла $\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-La}_2\text{S}_3$ для оптоелектронних застосувань / А.М. Ель Наггар, А.А. Альбассам, Г. Лакшмінараяна, В.В. Хальян В.В, Іващенко І.А., Кевшин А.Г. // *Фізика і хімія скла.* – 2019 – № 45. – С. 467–471.
6. Березнюк, О. Склоутворення в квазіпотрійних системах $\text{A}^1\text{S-B}^{\text{IV}}\text{S}_2\text{-C}^{\text{V}}\text{S}_3$ ($\text{A}^1\text{-Cu, Ag; B}^{\text{IV}}\text{-Ge, Sn, C}^{\text{V}}\text{-As, Sb}$) / О. Березнюк, І. Петрусь, О. Смітюх, І. Олексеюк // *Проблеми хімії та сталого розвитку* – 2021. – № 4. – С. 3–10.
7. Галян В.В. Синтез та понижувальна фотолюмінесценція легованих ербієм халькогеногенідних стекел систем $\text{AgCl(I)-Ga}_2\text{S}_3\text{-La}_2\text{S}_3$ / В.В. Галян, В.О. Юхимчук, І.А. Іващенко, В.С. Козак, П.В. Тищенко, І.Д. Олексеюк // *Прикладна оптика* – 2021. – № 60. – С. 5285–5290.
8. Чиллісі Е.Ф. $\text{Er}^{3+}\text{-Tm}^{3+}\text{co-legend}$ телуритові волокна для широкопсмугового оптичного волоконного підсилювача навколо діапазону 1550 нм, / Е. Ф. Чиллісі, Е. Родрігес, А. А. Р. Невес, В.К. Морейра, К.Л. Цезар, Л.Ц. Барбоза // *Технологія оптичного волокна.* – 2006. – С. 185-195.
9. Коугія К. Фотолюмінесценція в стеклах Ge-Ga-Se , легованих Er / К. Коугія, М. Мунзар, Д. Тончев, Ч. Дж. Хауген, Р.Г. Декорбі, Дж.Н. МакМаллін та інші // *Журнал люмінесценції* – 2005. – С. 92-96

REFERENCES:

1. Kumar K., Rai S.B., Rai A. (2008). Strong blue emission from Pr^{3+} ions through energy transfer process from Nd^{3+} to Pr^{3+} via Yb^{3+} in tellurite glass, *Spectrochim. Acta A* 71, 508–512. [in Ukrainian]
2. Nurhafizah H., Rohani M.S., Ghoshal S.K. (2016). $\text{Er}^{3+}:\text{Nd}^{3+}$ concentration dependent spectral features of lithium-niobate-tellurite amorphous media] *J. Non-Cryst. Solids*, 443, 23–32. [in Ukrainian]
3. Kityk I. V., Halyan V. V., Yukhymchuk V. O. Strelchuk V.V., Ivashchenko I. A., Zhydachevskii Ya., et al. (2018) Osoblyvosti NIR ta vydymoi liuminestsentsii lehovanoho erbiem $\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-La}_2\text{S}_3$ [NIR and visible luminescence features of erbium doped $\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-La}_2\text{S}_3$]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 498, 380–385. [in Ukrainian]
4. Hagerl Z., El-Mallawany R., Bulou A. (2011). Spektry liuminestsentsii ta optychni vlastyivosti stekel $\text{TeO}_2\text{-WO}_3\text{-Li}_2\text{O}$, lehovanykh ridkozemelnyimi ionamy Nd, Sm ta Er [Luminescence spectra and optical properties of $\text{TeO}_2\text{-WO}_3\text{-Li}_2\text{O}$ glasses doped with Nd, Sm and Er rare earth ions], *Physica B*, 406, 972–980. [in Ukrainian]
5. El Naggar A.M., Albassam A.A., Lakshminarayana G., Halyan V. V., I.A. Ivashchenko, A.H. Kevshyn (2019). Doslidzhennia neliniino-optychnykh vlastyvostei skla $\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-La}_2\text{S}_3$ dlia optoelektronnykh zastosuvan [Exploration of Nonlinear Optical Features of $\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-La}_2\text{S}_3$ Glasses for Optoelectronic Applications]. *Glass Physics and Chemistry*, 45, 467–471. [in Ukrainian]

6. Bereznyuk O., Petrus I., Smityukh O., Olekseiuk I. (2021). Skloutvorennia v kvazipotriinykh systemakh $A_2^I S-B^{IV}S_2-C_2^V S_3$ ($A^I-Cu, Ag; B^{IV}-Ge, Sn, C^V-As, Sb$). [Glass formation in quasi-ternary systems $A_2^I S-B^{IV}S_2-C_2^V S_3$ ($A^I-Cu, Ag; B^{IV}-Ge, Sn, C^V-As, Sb$)]. *Problemy khimii ta staloho rozvytku – Problems of chemistry and sustainable development*, 4, 3–10. [in Ukrainian]
7. Halyan V.V., Yukhymchuk V.O., Ivashchenko I.A., Kozak V.S., Tyshchenko P.V., Olekseyuk I.D. (2021). Syntez ta ponyzhuvalna fotoluminesentsiia lehovanykh erbiem khalkoholohenidnykh stekol system $AgCl(I)-Ga_2S_3-La_2S_3$ [Synthesis and downconversion photoluminescence of Erbium-doped chalcogenide glasses of $AgCl(I)-Ga_2S_3-La_2S_3$ systems]. *Applied Optics*, 60, 5285–5290. [in Ukrainian]
8. Chillce E.F., Rodriguez E., Neves A.A.R., Moreira W.C., César C.L., Barbosa L.C.(2006). $Er^{3+}-Tm^{3+}$ co-legged telurytovi volokna dlia shyrokosmuhovoho optychnoho volokonnoho pidsyliuvacha navkolo diapazonu 1550 nm [$Er^{3+}-Tm^{3+}$ co-doped tellurite fibers for broadband optical fiber amplifier around 1550 nm band], *OpticalFiberTechnology*, 2006, 185-195. [in Ukrainian]
9. Koughia K., Munzar M., Tonchev D., Haugen C.J., Decorby R.G., McMullin J.N., et al (2005). Fotoluminesentsiia v steklakh $Ge-Ga-Se$, lehovanykh Er [Photoluminescence in Er-doped $Ge-Ga-Se$ glasses], *Journal of Luminescence*, 92-96. [in Ukrainian]