

УДК 544.236.2

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2022-2-4>

Валентина КОЗАК

кандидат хімічних наук, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID: 0000-0002-4069-1008

Інна ІВАЩЕНКО

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

ORCID: 0000-0001-9724-0737

Володимир ГАЛЯН

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

ORCID: 0000-0003-0066-7174

Людмила ПІСКАЧ

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

ORCID: 0000-0003-3117-4006

Іван ОЛЕКСЕЮК

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

ORCID: 0000-0001-7206-4351

Бібліографічний опис статті: Козак, В., Іващенко, І., Галян, В., Піскач, Л., Олексєюк, І. (2022). Склоутворення в системах $Ga_2S_3 - La_2S_3 - A^IY$ ($A^I - Cu, Ag; Y - Cl, Br, I$) та властивості утворених стекол. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 2, 28–35, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2022-2-4>

СКЛОУТВОРЕННЯ В СИСТЕМАХ $Ga_2S_3 - La(PR)_2S_3 - A^IY$ ($A^I - Cu, Ag; Y - Cl, Br, I$) ТА ВЛАСТИВОСТІ УТВОРЕНИХ СТЕКОЛ

На основі результатів рентгенофазового аналізу встановлено межі областей склоутворення у квазіпотрійних системах протяжністю 2 мол.% CuI (система $Ga_2S_3 - La_{1,8}Pr_{0,2}S_3 - CuI$) та 5 мол.% $AgBr$ (система $Ga_2S_3 - La_2S_3 - AgBr$) усередину концентраційного трикутника. Максимальна температура синтезу становила 1370 К із подальшим гартуванням ампул у насичений водний розчин натрій хлориду з подрібненим льодом. За результатами ДТА визначені температурні характеристики стекол систем $Ga_2S_3 - La_{1,8}Pr_{0,2}S_3 - CuI$, $Ga_2S_3 - La_2S_3 - AgCl(Br, I)$: температури склування, кристалізації, плавлення та константа Гроби.

Досліджені спектри оптичного поглинання стекол складів: 66-х мол.% $Ga_2S_3 - 30$ мол.% $La_2S_3 - 4$ мол.% $AgCl - x$ мол.% Er_2S_3 , $x = 0; 1; 3$ мол.%; 67-х мол.% $Ga_2S_3 - 30$ мол.% $La_2S_3 - 3$ мол.% $AgI - x$ мол.% Er_2S_3 , $x = 0; 0,75; 1,5$ мол.%, у діапазоні 400–1050 нм. Встановлено, що стекла є прозорими у видимому діапазоні та містять вузькі смуги поглинання в Ербійовмісних зразках. У зразках з $AgCl$ інтенсивність максимумів поглинання вища, ніж з AgI , що пов'язано з переходом у збуджений стан більшої кількості іонів Ербію.

Ключові слова: квазіпотрійна система, халькогалогеніди, область склоутворення, рентгенофазовий аналіз, диференціально-термічний аналіз, спектри оптичного поглинання стекол.

Valentyna KOZAK

PhD in Chemistry, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Ukraine, 43025

ORCID: 0000-0002-4069-1008

Inna IVASHCHENKO

PhD in Chemistry, Professor, Professor at the Department of Chemistry and Technology, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Ukraine, 43025

ORCID: 0000-0001-9724-0737

Volodymyr HALYAN

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

ORCID: 0000-0003-0066-7174

Lyudmyla PISKACH

PhD in Chemistry, Professor, Professor at the Department of Chemistry and Technology, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Ukraine, 43025

ORCID: 0000-0003-3117-4006

Ivan OLEKSEYUK

Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of the Department of Chemistry and Technology, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Ukraine, 43025

ORCID: 0000-0001-7206-4351

To cite this article: Kozak, V., Ivashchenko, I., Halyan, V., Piskach, L., Olekseyuk, I. (2022). Skloutvorennia v systemakh $Ga_2S_3 - La_2S_3 - A^IY$ ($A^I - Cu, Ag; Y - Cl, Br, I$) ta vlastyvoli utvorenykh stekol [Glass formation regions in the systems $Ga_2S_3 - La_2S_3 - A^IY$ ($A^I - Cu, Ag; Y - Cl, Br, I$) and properties of obtained glasses]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 2, 28–35, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2022-2-4>

GLASS FORMATION REGIONS IN THE SYSTEMS $Ga_2S_3 - La_2S_3 - A^IY$ ($A^I - CU, AG; Y - CL, BR, I$) AND PROPERTIES OF OBTAINED GLASSES

Based on the X-ray phase analysis results of samples of quasi-ternary systems $Ga_2S_3 - La_{1.8}Pr_{0.2}S_3 - CuI$, $Ga_2S_3 - La_2S_3 - AgBr$, the boundaries of the glass-forming regions with a length of 2 mol.% CuI and 5 mol.% AgBr inside the concentration triangle were established. The maximum temperature of sample synthesis was 1370 K, followed by quenching of the ampoules in saturated aqueous sodium chloride solution with crushed ice. According to the DTA results, the temperature characteristics of the glasses of the $Ga_2S_3 - La_{1.8}Pr_{0.2}S_3 - CuI$, $Ga_2S_3 - La_2S_3 - AgCl$ (Br,I) systems were determined: glass transition, crystallization, melting and Hruby's constant temperatures.

The optical absorption spectra of glasses with the following compositions were studied: 66-x mol.% $Ga_2S_3 - 30$ mol.% $La_2S_3 - 4$ mol.% $AgCl - x$ mol.% Er_2S_3 , $x = 0; 1; 3$ mol.%; 67-x mol.% $Ga_2S_3 - 30$ mol.% $La_2S_3 - 3$ mol.% $AgI - x$ mol.% Er_2S_3 , $x = 0; 0,75; 1,5$ mol.%, in region 400–1050 nm. It was established that the glasses are transparent in the visible range and contain narrow absorption bands in Erbium-containing samples. In the AgCl containing samples the intensity of absorption maxima is higher than in samples with AgI, due to the fact that more Erbium ions move to the excited state.

Key words: quasi-ternary system, chalcogenides, region of glass formation, X-ray phase analysis, differential thermal analysis, optical absorption spectra of glasses.

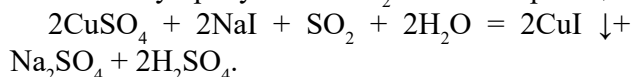
Вступ. Халькогалогенідні стекла, які утворюються у процесі взаємодії сполук Ga_2S_3 , La_2S_3 , Pr_2S_3 , CuI , $AgCl$ (Br,I), характеризуються високим коефіцієнтом пропускання інфрачервоного випромінювання, що важливо для їх використання як матеріалів інфрачервоної оптики,

як твердотільних електролітів (через високу іонну провідність іонів Ag^+). У разі додавання до них Er_2S_3 змінюються спектри фотолюмінесценції, що вказує на можливість їх використання як фотолюмінесцентних матеріалів (Тищенко, 2019; Ren et al., 2013; Popescu, 2002).

Тому для дослідження були вибрані системи $\text{Ga}_2\text{S}_3 - \text{La}(\text{Pr})_2\text{S}_3 - \text{Ag}(\text{Cu})\text{Br}(\text{I})$, які раніше не вивчалися. Як відомо, Празеодим, як і Лантан, утворює значну область склування під час взаємодії з Ga_2S_3 (Виноградова, 1984), є подібним до Лантану, тому дослідили можливість утворення скла в системі $\text{Ga}_2\text{S}_3 - \text{La}_{1,8}\text{Pr}_{0,2}\text{S}_3 - \text{CuI}$. Крім того, для стекел систем $\text{Ga}_2\text{S}_3 - \text{La}(\text{Pr})_2\text{S}_3 - \text{Ag}(\text{Cu})\text{Br}(\text{I})$ з додаванням Er^{3+} необхідно провести подальше вивчення оптичних спектрів поглинання для поглиблення знань щодо впливу галогенідів аргентуму на внутрішньоцентрові переходи Ербію.

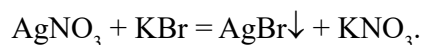
Експериментальна частина. Одержання склоподібних зразків систем здійснювали у два етапи. Перший етап – приготування сплаву необхідного складу з простих речовин високого ступеня чистоти ($\text{Cu} - 99,99$ ваг.%, $\text{Ga} - 99,99$ ваг.%, $\text{La} - 99,99$ ваг.%, $\text{Pr} - 99,99$ ваг.%) і бінарних сполук CuI та AgBr .

Купрум йодид отримували під час взаємодії $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ з NaI , взятими у стехіометричних кількостях у присутності SO_2 . Рівняння реакції:



Під час взаємодії розчинів утворювався бурий осад, який після пропускання SO_2 перетворювався на білий осад купрум йодиду. Утворений осад відфільтровували на лійці Бюхнера та промивали великою кількістю води до видалення іонів SO_4^{2-} (проба з BaCl_2). Щоб продукт не окислився, його промивали спочатку етанолом, потім диетиловим етером.

Аргентум бромід отримували під час взаємодії розчинів аргентум нітрату та калій броміду:



Сірку додатково очищували багаторазовою вакуумною перегонкою. Наважки вихідних компонентів зважували з точністю до $\pm 0,00005$ г на аналітичних терезах ВЛР-200.

Ампули з приготовленими наважками вакуумували до залишкового тиску $1,33 \times 10^{-2}$ Па та запаювали на газово-кисневому пальнику. Підготовлені ампули із шихтою поміщали в піч «Термодент» із програмованим контролем температури. Згідно з встановленою програмою підвищували температуру в печі до 670 К зі швидкістю 10 К/год з наступним відпадом протягом 48 годин. Далі підвищували температуру до 770 К зі швидкістю 10 К/год, подальший

відпал протягом 48 годин за вказаної температури. Наступне підвищення температури до 1000–1100 К залежно від складів зразків зі швидкістю 10 К/год, витримка 3 год та охолодження сплавів у режимі вимкненої печі. На наступному етапі одержані зразки перетирали в агатовій ступці, загрузали порошок у кварцові ампули зі сферичним дном діаметром 10 мм та перешийкою шириною 3–5 мм. Відкачували контейнери до тиску $1,33 \times 10^{-2}$ Па та запаювали. Далі зразки нагрівали зі швидкістю 40 К/год до температури 1370 К. За цієї температури витримували 3 год та гартували зразки в насичений водний розчин натрій хлориду з подрібненим льодом. Для запобігання розбризкуванню розплаву у процесі гартування, а також для зменшення втрат на конденсацію парової фази стінками ампул використовували термостатування шнуровим азбестом.

У результаті отримали прозорі зразки від коричнево-червоного до оранжево-червоного кольору. Відтінок забарвлення змінювався залежно від складу зразка. Наприклад, у разі введення Празеодиму були отримані темніші зразки, ніж безпосередньо з Лантаном. Атоми галогенів суттєво не впливали на зміну кольору зразків.

З отриманих сплавів були виготовлені проби та зняті дифрактограми (ДРОН-4-13, $\text{CuK}\alpha$ -випромінювання, крок сканування – $0,05^\circ$, час експозиції – 2 с). Також для стекел систем $\text{Ga}_2\text{S}_3 - \text{La}_{1,8}\text{Pr}_{0,2}\text{S}_3 - \text{CuI}$, $\text{Ga}_2\text{S}_3 - \text{La}_2\text{S}_3 - \text{AgCl}(\text{Br}, \text{I})$ був проведений диференційно-термічний аналіз (на установці «Термодент Н307/1» з двокоординатним самописцем ПДА-1).

Дослідження спектрів оптичного поглинання проводилося на базі монохроматора МДР-206 за кімнатної температури. Зразки вирізалися у вигляді плоскопаралельних пластин товщиною 1,5 мм, після чого стекла полірувалися алмазною пастою із зернистістю ~ 1 мкм. У спектральному діапазоні 500–1000 нм використовувалися кремнієві фотоприймачі, у діапазоні 1000–2000 нм – приймачі на основі PbS .

Результати та їх обговорення

1. Склоутворення в системі $\text{Ga}_2\text{S}_3 - \text{La}_{1,8}\text{Pr}_{0,2}\text{S}_3 - \text{CuI}$

Результати РФА з отриманих зразків показали відсутність кристалічних фаз, про що свідчить відсутність піків на дифрактограмах (див. рис. 1).

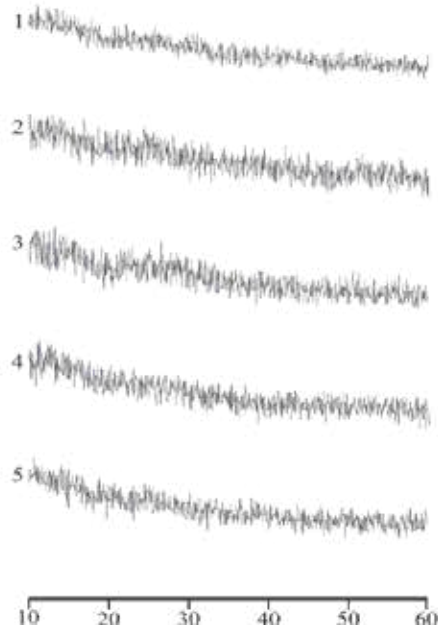


Рис. 1. Дифрактограми стекол системи $Ga_2S_3 - La_{1.8}Pr_{0.2}S_3 - CuI$:

- 1) 74 мол.% Ga_2S_3 – 26 мол.% $La_{1.8}Pr_{0.2}S_3$;
- 2) 68 мол.% Ga_2S_3 – 30 мол.% $La_{1.8}Pr_{0.2}S_3$ – 2 мол.% CuI ;
- 3) 64 мол.% Ga_2S_3 – 34 мол.% $La_{1.8}Pr_{0.2}S_3$ – 2 мол.% CuI ;
- 4) 61 мол.% Ga_2S_3 – 37 мол.% $La_{1.8}Pr_{0.2}S_3$ – 2 мол.% CuI ;
- 5) 57 мол.% Ga_2S_3 – 41 мол.% $La_{1.8}Pr_{0.2}S_3$ – 2 мол.% CuI

За результатами РФА була встановлена область склоутворення, яка перебуває в межах 50–75 мол.% у системі $Ga_2S_3 - La_{1.8}Pr_{0.2}S_3$ та простягається до 2 мол.% CuI всередину концентраційного трикутника (див. рис. 2).

Вигляд термограм для стекол системи $Ga_2S_3 - La_{1.8}Pr_{0.2}S_3 - CuI$ є характерним для склоподібних зразків (див. рис. 3). Були зафіксовані температури склування (T_g), кристалізації (T_c), плавлення (T_m) та обчислені $T_{gr} = T_g/T_m$

і константа Грубі $K_G = (T_c - T_g)/(T_m - T_c)$ (див. табл. 1).

Зразки стекол системи $Ga_2S_3 - La_{1.8}Pr_{0.2}S_3 - CuI$ мають невелику склоутворюючу здатність через невисоке значення константи Грубі та невелику різницю між температурами кристалізації і склування порівняно із системами, до складу яких входять такі сильні склоутворювачі, як $GeSe_2$, GeS_2 . Тому нові склоподібні матеріали мають невисокі технологічні характеристики, проте можуть володіти цікавими напівпровідниковими властивостями, що вимагає подальшого їх дослідження.

2. Склоутворення в системі $Ga_2S_3 - La_2S_3 - AgBr$ та термічні характеристики стекол $Ga_2S_3 - La_2S_3 - AgCl(Br, I)$

За результатами РФА встановлена область склоутворення в системі $Ga_2S_3 - La_2S_3 - AgBr$ (див. рис. 4), яка перебуває в концентраційних межах 50–75 мол.% Ga_2S_3 по перерізу $Ga_2S_3 - La_2S_3$ та простягається всередину концентраційного трикутника до 5 мол.% $AgBr$.

Для стекол систем $Ga_2S_3 - La_2S_3 - AgCl(Br, I)$ були виміряні температури склування (T_g), кристалізації (T_c), плавлення (T_m) та обчислені $T_{gr} = T_g/T_m$ і константа Грубі $K_G = (T_c - T_g)/(T_m - T_c)$ (див. табл. 2–4). Стекла систем $Ga_2S_3 - La_2S_3 - AgCl(I)$ були отримані в дисертаційній роботі П.В. Тищенка (Тищенко, 2019).

Зразки стекол системи $Ga_2S_3 - La_2S_3 - AgBr$ мають більшу склоутворюючу здатність порівняно зі стеклами системи $Ga_2S_3 - La_{1.8}Pr_{0.2}S_3 - CuI$.

3. Оптичні властивості стекол систем $Ga_2S_3 - La_2S_3 - AgCl(I)$

За кімнатної температури досліджено спектри оптичного поглинання стекол системи $Ga_2S_3 - La_2S_3 - AgCl(I)$ в діапазоні 400–1050 нм (див. рис. 5, 6).

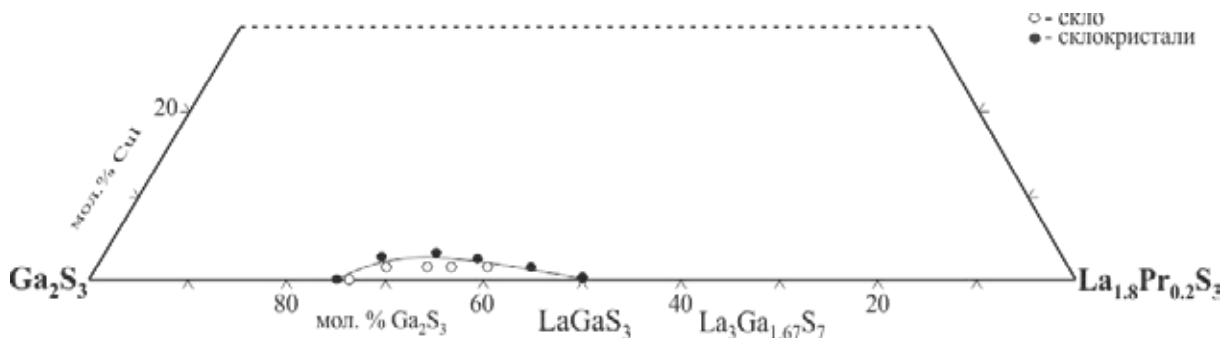


Рис. 2. Область склоутворення в системі $Ga_2S_3 - La_{1.8}Pr_{0.2}S_3 - CuI$

Вони показують, що стекла є прозорими у видимому діапазоні та містять вузькі смуги поглинання у зразках, легованих Ербієм. Збільшення вмісту Ербію приводить до зростання максимумів поглинання, які пов'язані з переходами з основного у збуджені стани ($^4F_{7/2}$, $^2H_{11/2}$, $^4S_{3/2}$, $^4F_{9/2}$, $^4I_{9/2}$, $^4I_{11/2}$) у f-оболонці Er^{3+} іонів. Крім

того, у зразках, у яких введено AgCl, інтенсивність максимумів поглинання вища, ніж у тих, що містять AgI. Це зумовлено тим, що більша кількість іонів Ербію перейшла у збуджений стан, оскільки в них введено вищу концентрацію Er_2S_3 . За збільшення вмісту цієї компоненти для обох систем дещо зростає коефіцієнт поглинання.

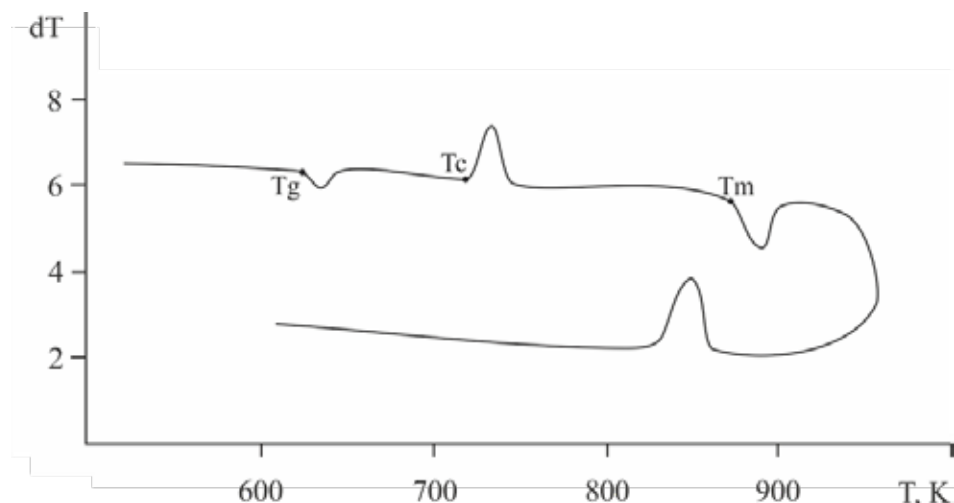


Рис. 3. Термограма склоподібного зразка складу 74 мол.% Ga_2S_3 – 26 мол.% $La_{1,8}Pr_{0,2}S_3$

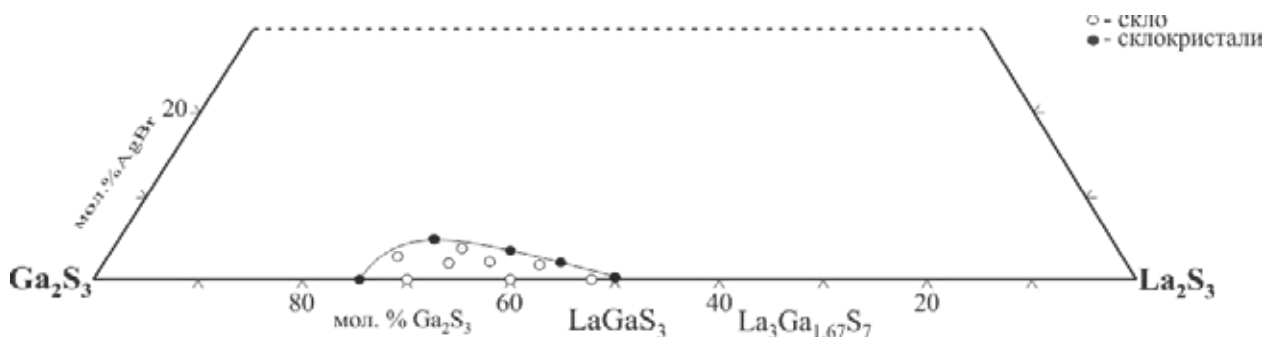


Рис. 4. Область склоутворення в системі $Ga_2S_3 - La_2S_3 - AgBr$

Таблиця 1

Характеристичні температури склоподібних зразків системи $Ga_2S_3 - La_{1,8}Pr_{0,2}S_3 - CuI$

Склад сплаву, мол. %	$La_{1,8}Pr_{0,2}S_3$	26	30	34	37	41
	Ga_2S_3	74	68	64	61	57
	CuI	—	2	2	2	2
T_g, K		570	554	540	580	550
T_c, K		622	616	580	620	650
T_m, K		870	860	824	862	894
T_{gr}, K		0,655	0,644	0,655	0,672	0,615
$T_m - T_c, K$		248	254	244	242	244
$T_c - T_g, K$		52	52	40	40	100
K_G		0,209	0,205	0,164	0,165	0,409

Отже, у разі додавання AgCl(I) збільшується прозорість стекол у видимому та близькому інфрачервоному діапазоні. Це важливо для застосування халькогалогенідних стекол як матеріалів для активних і пасивних середовищ лазерної техніки, оптичних підсилювачів, оптоволоконних мереж тощо.

У спільній роботі низки авторів (Kityk et al., 2018) досліджено спектри поглинання стекол системи Ga₂S₃ – La₂S₃ – Er₂S₃. Порівнюючи їх із дослідженнями, проведеними в цій роботі,

можемо зауважити, що коефіцієнт оптичного поглинання менший у стеклах, що містять галогенідну компоненту.

Висновки. Методом РФА вперше встановлена область склоутворення в системі Ga₂S₃ – La_{1,8}Pr_{0,2}S₃ – CuI протяжністю всередину концентраційного трикутника 2 мол.% CuI та в системі Ga₂S₃ – La₂S₃ – AgBr протяжністю всередину концентраційного трикутника 5 мол.% AgBr. За результатами ДТА визначені температурні характеристики стекол Ga₂S₃ – La_{1,8}Pr_{0,2}S₃ – CuI,

Таблиця 2

Характеристичні температури склоподібних зразків системи Ga₂S₃ – La₂S₃ – AgCl

Склад сплаву, мол.%	La ₂ S ₃	30	30	30	30
	Ga ₂ S ₃	67	66	65	64
	AgCl	3	4	5	6
T _g , K		644	680	640	640
T _c , K		654	716	654	664
T _m , K		860	844	862	850
T _{gr} , K		0,49	0,806	0,742	0,753
T _m -T _c , K		206	128	208	186
T _c -T _g , K		10	36	14	24
K _G		0,049	0,218	0,067	0,129

Таблиця 3

Характеристичні температури склоподібних зразків системи Ga₂S₃ – La₂S₃ – AgBr

Склад сплаву, мол.%	La ₂ S ₃	42	34	31	26
	Ga ₂ S ₃	56	63	63	70
	AgBr	2	3	6	4
T _g , K		622	606	589	600
T _c , K		672	661	650	650
T _m , K		852	855	850	865
T _{gr} , K		0,655	0,644	0,655	0,672
T _m -T _c , K		180	194	200	215
T _c -T _g , K		50	55	61	50
K _G		0,278	0,284	0,305	0,233

Таблиця 4

Характеристичні температури склоподібних зразків системи Ga₂S₃ – La₂S₃ – AgI

Склад сплаву, мол.%	La ₂ S ₃	30	30	30	30
	Ga ₂ S ₃	67	66	65	64
	AgI	3	4	5	6
T _g , K		606	636	606	680
T _c , K		654	668	646	700
T _m , K		866	906	830	844
T _{gr} , K		0,699	0,702	0,730	0,829
T _m -T _c , K		202	238	184	144
T _c -T _g , K		58	32	40	20
K _G		0,287	0,134	0,217	0,139

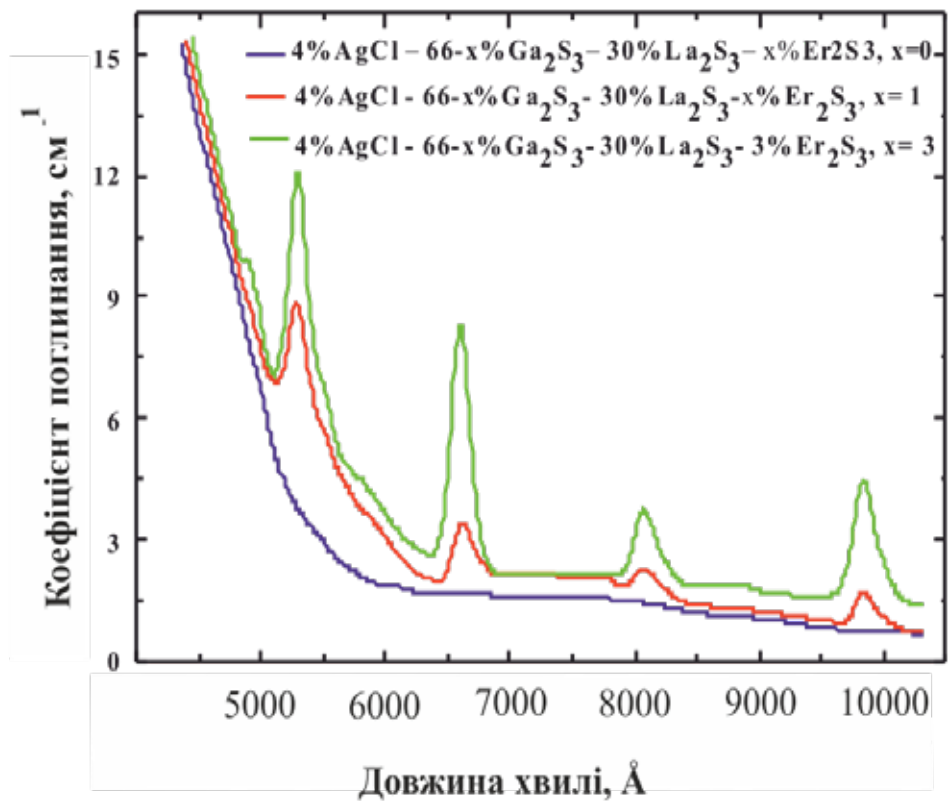


Рис. 5. Спектри поглинання стекол $\text{Ga}_2\text{S}_3 - \text{La}_2\text{S}_3 - \text{Er}_2\text{S}_3 - \text{AgCl}$

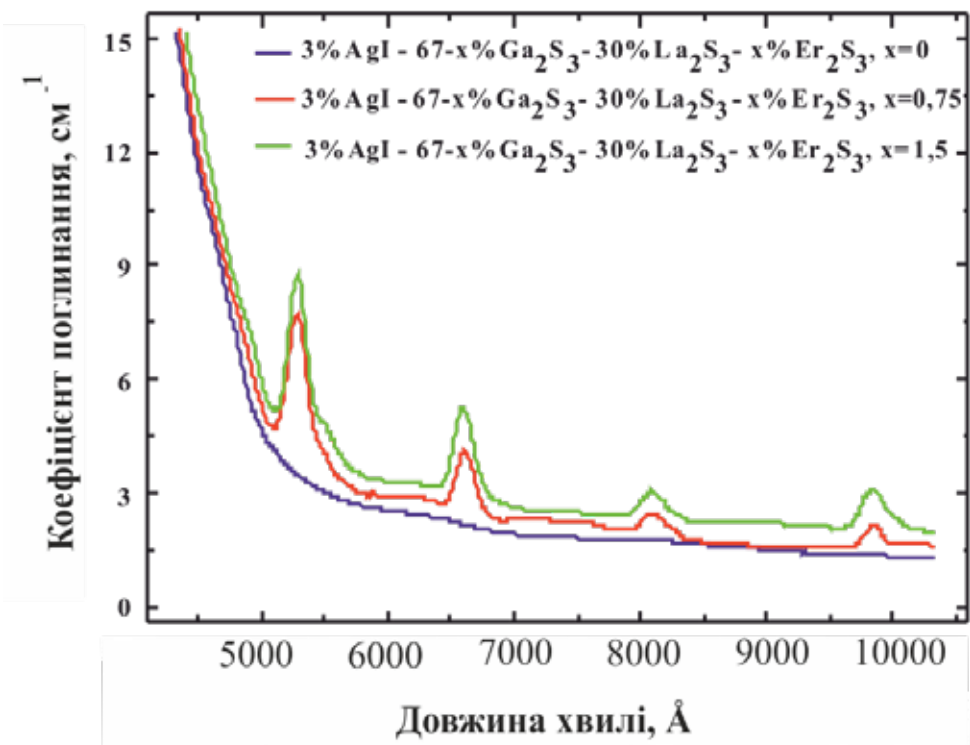


Рис. 6. Спектри поглинання стекол $\text{Ga}_2\text{S}_3 - \text{La}_2\text{S}_3 - \text{Er}_2\text{S}_3 - \text{AgI}$

$\text{Ga}_2\text{S}_3 - \text{La}_2\text{S}_3 - \text{AgCl}(\text{Br}, \text{I})$, зокрема константа Грубі K_G , що знижує своє значення в разі додавання галогенідів до стекол $\text{Ga}_2\text{S}_3 - \text{La}_2\text{S}_3$.

Уперше досліджені спектри оптичного поглинання стекол складів: 66-х мол.% $\text{Ga}_2\text{S}_3 - 30$ мол.% $\text{La}_2\text{S}_3 - 4$ мол.% $\text{AgCl} - x$ мол.% Er_2S_3 , $x = 0; 1; 3$ мол.%; 67-х мол.% $\text{Ga}_2\text{S}_3 - 30$ мол.% $\text{La}_2\text{S}_3 - 3$ мол.% $\text{AgI} - x$ мол.% Er_2S_3 , $x = 0; 0,75; 1,5$ мол.%, у діапазоні 400–1050 нм. Встанов-

лено, що стекла є прозорими у видимому діапазоні та містять вузькі смуги поглинання в Ербійвмісних зразках. У зразках з AgCl інтенсивність максимумів поглинання вища, ніж з AgI , що пов'язано з переходом у збуджений стан більшої кількості іонів Ербію. Отже, досліджені халькогенгалогенідні стекла можна рекомендувати як матеріали для активних і пасивних середовищ лазерної техніки.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Тищенко П.В. Фазові рівноваги квазіпотрійних систем на основі сполук A^1X , $\text{B}^{\text{III}}\text{X}_3$, R_2X_3 , A^1Y ($\text{A}^1 - \text{Cu}, \text{Ag}$; $\text{B}^{\text{III}} - \text{Ga}, \text{In}$; $\text{R} - \text{La}, \text{Er}$; $\text{X} - \text{S}, \text{Se}$; $\text{Y} - \text{Cl}, \text{I}$) та властивості проміжних фаз і стекол : дис. ... канд. хім. наук : 02.00.01. Ужгород, 2019. 154 с.
2. Conductivity study on $\text{GeS}_2 - \text{Ga}_2\text{S}_3 - \text{AgI} - \text{Ag}$ chalcogenide glasses / J. Ren, Q. Yan, T. Wagner, V. Zima, M. Frumar, B. Frumarova, G. Chen. *J. Appl. Phys.* 2013. Vol. 114. Iss. 2. P. 023701. DOI: 10.1063/1.4813139.
3. Popescu M.A. Non-crystalline chalcogenides. New York : Kluwer Academic Publishers, 2002. 384 p.
4. Виноградова Г.З. Стеклообразование и фазовые равновесия в халькогенидных системах. Москва : Наука, 1984. 172 с.
5. NIR and visible luminescence features of erbium doped $\text{Ga}_2\text{S}_3 - \text{La}_2\text{S}_3$ glasses / I.V. Kityk, V.V. Halyan, V.O. Yukhymchuk, V.V. Strelchuk, I.A. Ivashchenko, Ya. Zhydachevskii, A. Suchocki, I.D. Olekseyuk, A.G. Kevshyn, M. Piasecki. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2018. Vol. 498. P. 380–385.

REFERENCES:

1. Tyshchenko, P.V. (2019). Fazovi rivnovahy kvazipotriinykh system na osnovi spolk A^1X , $\text{B}^{\text{III}}\text{X}_3$, R_2X_3 , A^1Y ($\text{A}^1 - \text{Cu}, \text{Ag}$; $\text{B}^{\text{III}} - \text{Ga}, \text{In}$; $\text{R} - \text{La}, \text{Er}$; $\text{X} - \text{S}, \text{Se}$; $\text{Y} - \text{Cl}, \text{I}$) ta vlastyvoli promizhnykh faz i stekol [Phase equilibria of quasi-ternary systems based on compounds A^1X , $\text{B}^{\text{III}}\text{X}_3$, R_2X_3 , A^1Y ($\text{A}^1 - \text{Cu}, \text{Ag}$; $\text{B}^{\text{III}} - \text{Ga}, \text{In}$; $\text{R} - \text{La}, \text{Er}$; $\text{X} - \text{S}, \text{Se}$; $\text{Y} - \text{Cl}, \text{I}$) and properties of intermediate phases and glasses]. *Candidate's thesis*. Uzhhorod [in Ukrainian].
2. Ren, J., Yan, Q., Wagner, T., Zima, V., Frumar, M., Frumarova, B., Chen, G. (2013). Conductivity study on $\text{GeS}_2 - \text{Ga}_2\text{S}_3 - \text{AgI} - \text{Ag}$ chalcogenide glasses. *J. Appl. Phys.*, vol. 114, iss. 2, p. 023701. DOI: 10.1063/1.4813139 [in English].
3. Popescu, M.A. (2002). Non-crystalline chalcogenides. New York: Kluwer Academic Publishers [in English].
4. Vynogradova, H.Z. (1984). Stekloobrazovanye y fazovye ravnovesya v khalkohenydnykh systemakh [Glass formation and phase equilibria in chalcogenide systems]. Moscow: Nauka [in Russian].
5. Kityk, I.V., Halyan, V.V., Ykhymchuk, V.O., Strelchuk, V.V., Ivashchenko, I.A., Zhydachevskii, Ya., Suchocki, A., Olekseyuk, I.D., Kevshyn, A.G., Piasecki, M. (2018). NIR and visible luminescence features of erbium doped $\text{Ga}_2\text{S}_3 - \text{La}_2\text{S}_3$ glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 498, pp. 380–385 [in English].