

УДК 621.315.592

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-14>

Тетяна ЯЦИНЮК

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

ORCID ID: 0000-0001-9724-0737

SCOPUS-AUTHOR ID: 7003831212

Ганна ШАВАРОВА

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

ORCID ID: 0000-0003-0251-9327

Микола ШЕВЧУК

кандидат хімічних наук, доцент кафедри матеріалознавства Луцького національного технічного університету, доцент. вул. Львівська, 75, м. Луцьк, Україна, 43018

ORCID ID: 0000-0001-9471-6314

Костянтин МЕЛЬНИЧУК

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

ORCID ID: 0000-0003-0807-2140

Бібліографічний опис статті: Яцинюк, Т., Кевшин, А., Галян, В., Іващенко, І., Шаварова Г., Шевчук, М., Мельничук, К., Іванюк, Д. (2022). Люмінесцентні властивості рідкісноземельних металів в кристалічних та скляних середовищах. *Фізика та освітні технології*, 1, 107–115, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-14>

ЛЮМІНЕСЦЕНТНІ ВЛАСТИВОСТІ РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНИХ МЕТАЛІВ У СКЛЯНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

У статті проаналізовано особливості випромінювання рідкісноземельних металів (РЗМ) під впливом збуджуючих чинників. Застосовано теорію випромінювальної та безвипромінювальної релаксації в 4f-оболонці іонів РЗМ для встановлення механізму випромінювання. Розглянуто основні процеси, які відбуваються в люмінесцентних центрах. Досліджено та систематизовано чинники, що впливають на люмінесцентні властивості деяких халькогенідних матриць, які леговані іонами РЗМ. Проаналізовано природу фотонів випромінювання, яке залежить від вихідного і кінцевого стану та від механізму збудження. З'ясовано, що для одержання інтенсивного випромінювання в заданому спектральному діапазоні необхідно встановити енергетичне положення основного та збуджених станів активуючих домішок, а також механізм випромінювальної релаксації, внаслідок чого відбувається перехід системи в метастабільний або основний стан.

Експериментальні дані з літературних джерел свідчать про значний вплив дефектів, домішок, неоднорідностей та локального оточення біля рідкісноземельних іонів у склоутворюючій матриці на процеси випромінювання світла в скляних середовищах. Встановлено, що більший час релаксації є результатом зменшення ймовірності безвипромінювальної релаксації внаслідок великої енергетичної відстані між збудженими станами і низької енергії фонів склоутворюючої матриці. Зменшення часу релаксації може відбуватись також внаслідок енергетичного трансферу між іонами РЗМ.

Аналіз проведених досліджень свідчить, що для встановлення механізму фотолюмінесценції (ФЛ) в різних матрицях та для підвищення її ефективності необхідно поєднати моделі випромінювання іонів РЗМ із експериментальними результатами. Інтерпретація експериментальних даних щодо спектрів фотолюмінесценції та оптичного поглинання проведена на основі детального вивчення механізмів випромінюючих переходів у різних халькогенідних матрицях.

Ключові слова: люмінесценція, механізм випромінювання, рідкісноземельні метали, релаксація іонів, халькогенідна матриця.

Tetiana YATSYNIUK

Postgraduate Student, 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 at 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 at 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

Ganna SHAVAROVA

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at 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: 0000-0003-0251-9327

Mykola SHEVCHUK

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor at the Department of Materials Science, Lutsk National Technical University, 75 Lvivska Street, Lutsk, 43018, Ukraine

ORCID ID: 0000-0001-9471-6314

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., Shavarova, A., Shevchuk, M., Melnychuk, K., Ivanyuk, D. (2022). Luminestentni vlastyvoli ridkiszozemelnykh metaliv v krystalichnykh ta sklianykh seredovyshchakh [Luminescent properties of rare-earth metals in crystalline and glass environments]. *Physics and Educational Technology*, 1, 107–115, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-14>

LUMINESCENT PROPERTIES OF RARE-EARTH METALS IN GLASS ENVIRONMENTS

The article analyzes the features of radiation of the rare earth metals (REM) under influence of exciting factors. The theory of radiative and non-radiative relaxation in the 4f-shell of REM ions was applied to establish the radiation mechanism. The main processes that take place in luminescent centers are considered. Factors affecting the luminescent properties of some chalcogenide matrices doped REM ions were studied and systematized. The nature of radiation photons, which depends on the initial and final state and on the excitation mechanism, is analyzed. It was found that in order to obtain intense radiation, in a given spectral range, it is necessary to establish the energy position of the ground and excited states of activating impurities, as well as the mechanism of radiative relaxation, as a result of which the system transitions to a metastable or ground state.

Experimental data from literary sources indicate a significant influence of defects, impurities, inhomogeneities and the local environment near rare earth ions in the glass-forming matrix on the processes of light emission in glass media. It was established that the longer relaxation time is the result of a decrease in the probability of nonradiative relaxation due to the large energy distance between excited states and the low energy of phonons of the glassy matrix. A decrease in the relaxation time can also occur as a result of the energy transfer between the REM ions.

The analysis of research shows that in order to establish the mechanism of photoluminescence (PL) in various matrices and to increase its efficiency, it is necessary to combine the models of radiation of REM ions with experimental results. The interpretation of experimental data on photoluminescence and optical absorption spectra is based on a detailed study of the mechanisms radiative transitions in various chalcogenide matrices.

Key words: luminescence, radiation mechanism, rare earth metals, relaxation of ions, chalcogenide matrix.

Вступ

Нетеплове випромінювання речовиною вирізняє процес люмінесценції від випро-

мінювання нагрітих тіл, а також від розсіювання світла та гальмівного випромінювання Вавілова-Черенкова. Люмінесценція з'явля-

ється внаслідок випромінюючих переходів між двома станами атомів або молекул. Природа фотонів випромінювання залежить від вихідного і кінцевого стану та від механізму збудження (Nalyan, 2013; Nalyan, 2019). Отже, для одержання інтенсивного випромінювання у заданому спектральному діапазоні необхідно з'ясувати енергетичне положення основного та збуджених станів активуючих домішок, а також механізм випромінювальної релаксації, внаслідок чого відбувається перехід системи в метастабільний або основний стан. На рис. 1 подано схему енергетичних рівнів в іонах рідкісноземельних металів (РЗМ), через які найчастіше відбувається випромінювання у видимому та ближньому ІЧ діапазонах.

Результати досліджень

Невелика частина атомів сполук (домішок, дефектів) можуть перетворювати поглинуту електромагнітну хвилю у світло видимого або інфрачервоного спектральних діапазонів (Асабина, 2012). До ефективних люмінесцентних середовищ, які знаходять широке застосування в оптоелектронній техніці, відносять халькогенідні стекла та кристали, леговані, як правило, домішками Ho, Tm, Nd, Sm, Eu, Yb, Er.

(Lupan, 2009; Tver'yanovich, 1999; Kang, 2010; Shen, 2010; Wang, 2010). Останній, проявляючи інтенсивне випромінювання з довжиною хвилі 1,54 мкм, найбільше досліджується внаслідок значного поширення оптоволоконних систем зв'язку, які працюють на випромінюванні з такою ж довжиною хвилі і здатні передавати великі масиви захищеної інформації, що створює переваги в порівнянні з радіозв'язком.

У люмінесцентних матеріалах досліджують спектри поглинання, люмінесценції та особливості структури кристалічної / склоподібної матриці активованої РЗМ. Особливу увагу приділяють вивченню кінетики люмінесценції, яка дозволяє отримати інформацію не тільки про енергію початкових і кінцевих станів іонів, але про ймовірність переходів у досліджуваних середовищах.

Серед халькогенідних матеріалів дослідженню спектрів ФЛ у видимій ділянці спектру найбільше уваги приділяють сульфідним напівпровідникам. Це пов'язано з тим, що в сульфідів (у порівнянні з Se- та Te- вмісними матеріалами) край оптичного поглинання найбільше зміщений у короткохвильову сторону. У цих матеріалах збудження ФЛ часто здійс-

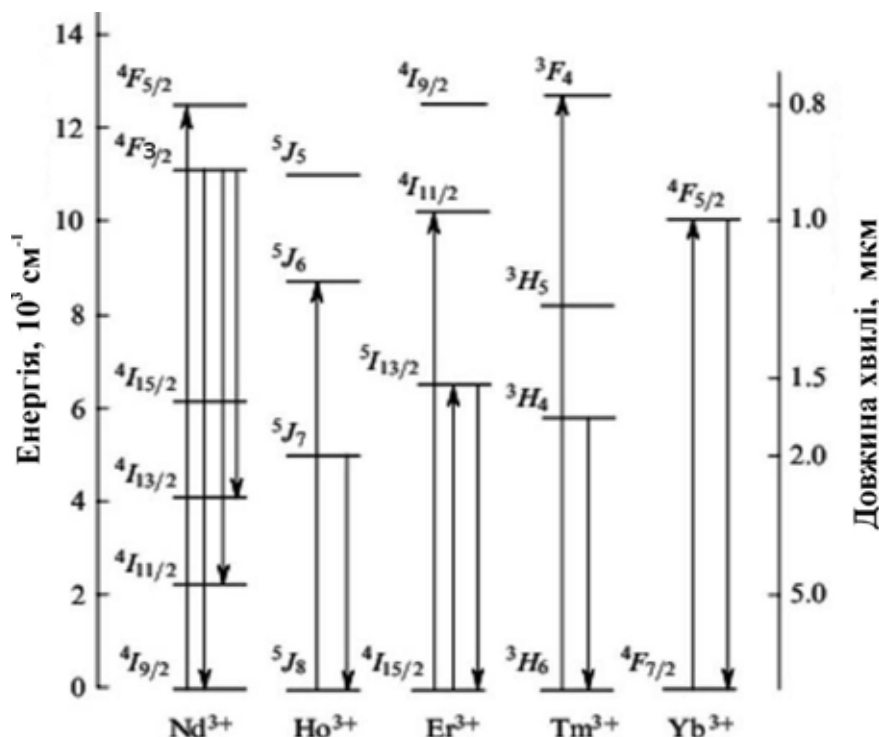


Рис. 1. Структура енергетичних рівнів деяких іонів РЗМ (Курков, 2004).

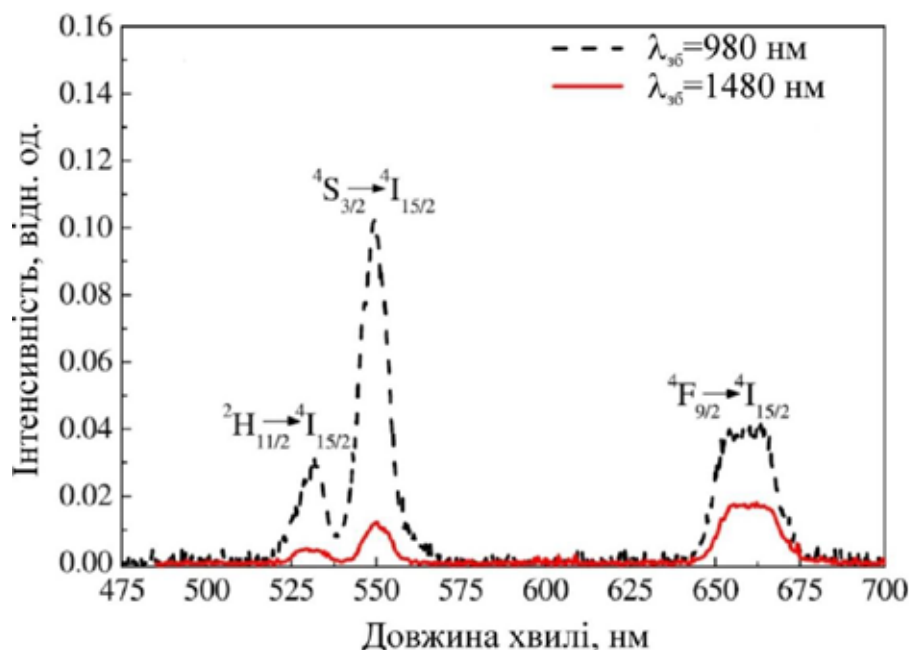


Рис. 2. Спектри ап-конверсійної ФЛ стекел $\text{Ga}_{10}\text{Ge}_{25}\text{S}_{65} : (\text{Er}_2\text{S}_3)_{0,25}$, збуджені випромінюванням з довжиною хвилі 980 та 1480 нм, (Lozano, 2019)

снюють лазерами, в яких максимум випромінювання відповідає резонансним переходам в іонах РЗМ в інфрачервоному спектральному діапазоні. У сульфідних халькогенідах, легованих ербієм (рис. 2), відбувається перетворення (ап-конверсія) інфрачервоного у видиме світло, що знаходить застосування в оптиці цивільного та військового приладобудування.

Основними процесами, які можуть призвести до переходів в іонах Er^{3+} , є поглинання збудженими станами [Nalyan, 2017] (excited state absorption – ESA), кросрелаксація релаксація [Kityk, 2018] (cross-relaxation – CR) та енергетичний трансфер [Nalyan, 2021] (energy transfer – ET) (рис. 3). Збудження склоутворюючої матриці з подальшим ET до іонів Er^{3+} розглядається, як альтернативний шлях виникнення збуджених станів в іонах РЗМ.

Довжина хвилі збуджуючого випромінювання (980 нм) знаходиться в резонансі з переходами $^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ і $^4I_{11/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$. Після переходу іонів Er^{3+} в стан $^4F_{7/2}$, відбуваються безвипромінювальні переходи у стани $^2H_{11/2}$ і $^4S_{3/2}$ з виникненням зелених смуг ФЛ через переходи $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ та $^2H_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$. Смуга ФЛ в червоній спектральній області (перехід $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$) обумовлена збудженням станів $^4F_{9/2}$ завдяки багатофоновій релаксації зі стану $^4S_{3/2}$, а також

CR (рис. 3) із залученням іонів, які знаходяться у станах $^4I_{9/2}$ та $^4S_{3/2}$ [Lozano, 2019].

Описаний механізм виникнення збуджених станів в іонах Er^{3+} і подальше випромінювання, як видно з рис. 3, містить велику кількість шляхів реалізації, тому не зрозуміло, який із них найбільше ймовірний. Крім того, авторами роботи [Lozano, 2019] не враховано енергію фононів склоутворюючої матриці, що дозволило б встановити, який із шляхів є пріоритетним, а який малоімовірним. Наприклад, у сульфідних стеклах енергія фононів становить близько 300 – 450 cm^{-1} (Messaddeq, 2001; Nalyan, 2013). Тому багатофоновна релаксація з $^4S_{3/2}$ у стан $^4F_{9/2}$ є малоімовірною внаслідок великої енергетичної відстані між ними. Для того, щоб визначити пріоритетні шляхи реалізації збуджених станів і встановити єдиний механізм виникнення смуг ФЛ, необхідно було провести комплексні дослідження: проаналізувати спектральний розподіл ФЛ з різним вмістом РЗМ у видимому та близькому ІЧ діапазонах; дослідити кінетику затухання ФЛ для різних смуг ФЛ та вивчити люмінесцентні властивості в різних температурних режимах.

Механізм випромінювальної та безвипромінювальної релаксації як для рекомбінаційної,

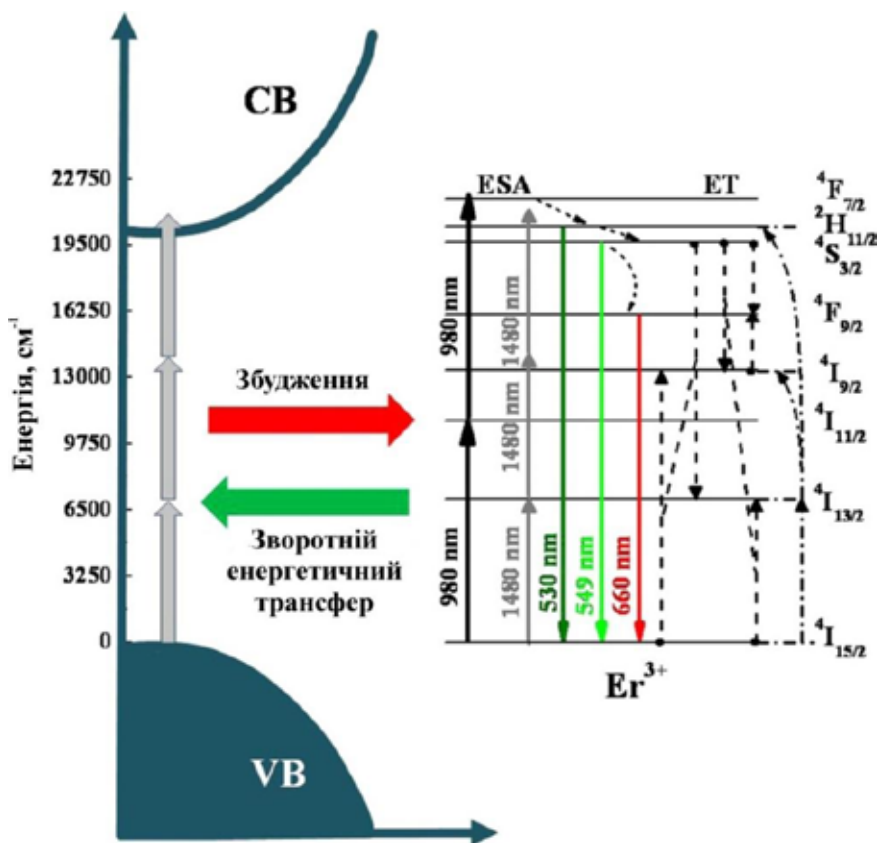


Рис. 3. Схема енергетичних рівнів в іонах Er^{3+} та енергетичних зон (conduction band – CB, valence band – VB) склоутворюючої матриці (Lozano, 2019)

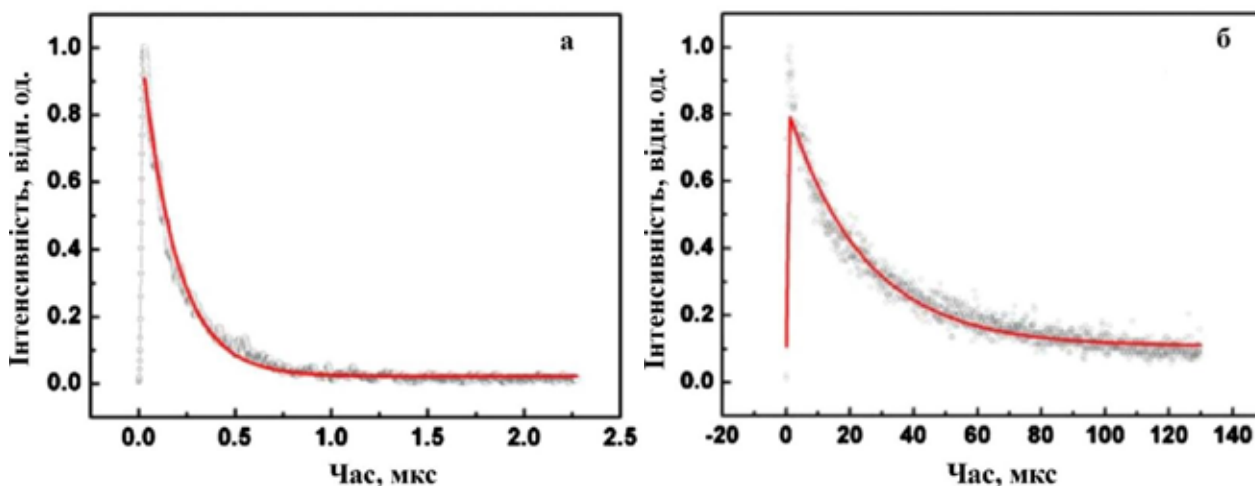


Рис. 4. Часова залежність інтенсивності ФЛ при збудженні випромінюванням з довжиною хвилі 980 нм (точки – експериментальні дані, червона лінія – апроксимація)
 а – ${}^4\text{F}_{7/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$; б – ${}^2\text{H}_{11/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ (Frej, 2010)

так і для внутрішньоцентрової ФЛ допомагають встановити вимірювання кінетики затухання ФЛ. На рис. 4 подано часову залежність зменшення інтенсивності ФЛ для стекел $\text{Ga}_{10}\text{Ge}_{25}\text{S}_{65}$ легованих ербієм. Час релаксації (τ) залежить

від багатьох чинників, зокрема від станів, між якими відбувається випромінюючий перехід в РЗМ. До прикладу: ${}^4\text{F}_{7/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ (рис. 4 а) $\tau = 67,5$ мкс; ${}^2\text{H}_{11/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2} - 24,2$ мкс (рис. 4 б) (Frej, 2010).

Безвипромінювальна багатофононна релаксація залежить від енергії фононів. Чим більша енергія фононів, тим ймовірніше відбудеться безвипромінювальна релаксація іонів РЗМ. Тобто зменшення енергії фононів

призводить до збільшення часу життя (τ) та квантової ефективності збудженого рівня і збільшення інтенсивності антистоксової люмінесценції. Оскільки енергія фононів залежить від локального оточення біля рідкісноземельних іонів у склоутворюючій матриці, то останнє має значний вплив на антистоксову люмінесценцію. Отже, більший час релаксації є результатом зменшення ймовірності безвипромінювальної релаксації внаслідок великої енергетичної відстані між цими станами і низької енергії фононів склоутворюючої матриці. Зменшення часу релаксації може відбуватись також внаслідок енергетичного трансферу між іонами РЗМ. Автори роботи (Li, 2016) досліджували ФЛ стеклов системи Ga-Sb-S легованих ербієм і празеодимом.

Релаксація інтенсивності ФЛ з максимумом 1550 нм (рис. 5) аналізувалась при збудженні стеклов випромінюванням з довжиною хвилі 808 нм. Часову залежність інтенсивності ФЛ апроксимовано однією експонентою та визначено час релаксації ($\tau = 2,10$ мс) для зразків легованих Er і Er/Pr де: τ_{Er} і $\tau_{Er/Pr}$ – часи життя збудженого стану ${}^4I_{13/2}$, виміряні при 1550 нм в Er-легованих і Er/Pr-легованих зразках, відповідно. Ефективність η_{ET} становить 71% для Er/Pr-легованих стеклов системи Ga-Sb-S. Цей результат свідчить, що іони Pr^{3+} можуть ефективно використовуватись для зменшення ефективності випромінювання іонів Er^{3+} в стані ${}^4I_{13/2}$. Крім того, зменшення часу життя Er^{3+} в стані ${}^4I_{13/2}$ також вказує на процес ET від Er^{3+} до іонів Pr^{3+} , що знаходяться в стані 3F_4 і 3F_3 (Golding, 2000). Експериментальні результати [Li, 2016] свідчать, що введення Pr^{3+} підвищує інтенсивність інфрачервоної ФЛ при 2740 нм шляхом передачі енергії від іонів Er^{3+} (стан ${}^4I_{13/2}$) до Pr^{3+} (стан ${}^3F_{4,3}$) і одночасно приводить до зменшення інтенсивності ФЛ при 1550 нм.

Ефективність ET між Er^{3+} і Pr^{3+} проаналізовано, використовуючи час релаксації, визначений з експерименту за формулою (Нео, 1997; Tian, 2012):

$$\eta_{ET} = 1 - \frac{\tau_{Er/Pr}}{\tau_{Er}}$$

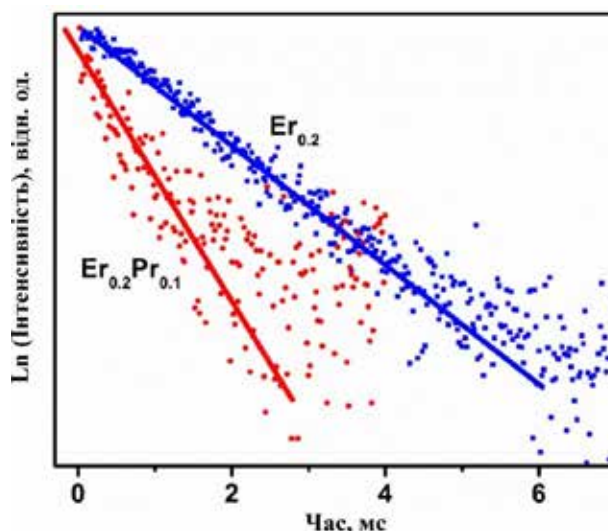


Рис. 5. Часова залежність інтенсивності ФЛ (перехід ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$) стеклов системи Ga-Sb-S, легованих Er та Er/Pr ($\lambda_{36} = 808$ нм) (Li, 2016)

Підвищення інтенсивності ФЛ (2740 нм) в Er/Pr-легованих стеклах є надзвичайно важливим завданням, оскільки випромінювання з цією довжиною хвилі застосовують в медичній галузі при конструюванні «лазерних ножів». Водночас зауважимо, що в статті (Li, 2016) для Er/Pr-легованих стеклов системи Ga-Sb-S не розкрито єдиний механізм виникнення збуджених станів ${}^4I_{11/2}$ і збільшення ймовірності випромінюючих переходів ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ при опроміненні лазером із довжиною хвилі 808 нм (перехід ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$).

Загалом, наукових досліджень щодо особливостей ФЛ в халькогенідних склоподібних сплавах є значно більше у порівнянні з монокристалічними напівпровідниками легованими РЗМ. Це пов'язано з тим, що існує порівняно невелика кількість сполук, в яких можна ввести РЗМ, як основну компоненту. Крім того, варіація складу кристалічної матриці обмежена розчинністю РЗМ, що значно звужує ряд ефективних люмінесцентних матеріалів.

Висновки

Халькогенідні напівпровідники (сполуки з елементами Te, Se, S) є перспективними матеріалами з унікальними властивостями, які широко застосовують у лазерній техніці, оптоелектронних пристроях та телекомунікаціях. Вводячи в склад кристалічних, склоподібних сплавів контрольовані домішки та індукуючи дефекти, можна змінювати локальну структуру

та спектрально-оптичні характеристики твердих тіл.

Застосовуючи теорію випромінювальної та безвипромінювальної релаксації в 4f-оболонці іонів РЗМ, розглянуто основні процеси, які відбуваються в люмінесцентних центрах. Досліджено та систематизовано фактори,

що впливають на люмінесцентні властивості деяких халькогенідних матриць, які леговані іонами РЗМ. Найявні в літературних джерелах експериментальні дані свідчать про значний вплив дефектів, домішок і неоднорідностей на процеси випромінювання світла в напівпровідниках.

ЛІТЕРАТУРА:

- Halyan V.V., Kevshyn A.H., Davydyuk G.Ye., Shevchuk N.V. Mechanism of anti-stokes photoluminescence in $\text{Ag}_{0.05}\text{Ga}_{0.05}\text{Ge}_{0.95}\text{S}_2\text{-Er}_2\text{S}_3$ glassy alloys. *Glass Phys. Chem.* 2013. Vol. 39. P. 52–56.
- Halyan V.V., Ivashchenko I.A., Kevshyn A.H., Olekseyuk I.D., Tishchenko P.V., Tretyak A.P. Growth of the $(\text{Ga}_{69.5}\text{La}_{29.5}\text{Er})_2\text{S}_{300}$ Single Crystal and Mechanism of Stokes Emission / *J. Nano- Electron. Phys.* 2019. Vol. 11. P. 01008-1–01008-4.
- Асабина Е.А. Дефекты в твердых телах и их влияние на свойства функциональных материалов. *Нужный-Новгород* : НГУ, 2012. С. 65.
- Lupan E. Emission spectra of $\text{Ge}_{25}\text{Ga}_{1.7}\text{As}_{8.3}\text{S}_{65}$ glass doped with Sm^{3+} and Nd^{3+} . *J Non-Oxide Glass.* 2009. V. 1, No. 3. P. 183–189.
- Tver'yanovich Yu.S., Degtyarev S.V., Pivovarov S.S. [and others]. The environment of Nd^{3+} , Sm^{3+} , Yb^{3+} in chalcogenide glasses containing gallium and germanium / *J. Non Cryst. Solids.* 1999. Vol. 256-257. P. 95–99.
- Zh. Xu, Kang X., Ch. Li [and others] Ln^{3+} ($\text{Ln} = \text{Eu}, \text{Dy}, \text{Sm}, \text{and Er}$) ion-doped YVO_4 nano/microcrystals with multiform morphologies: Hydrothermal synthesis, growing mechanism, and luminescent properties. *Inorg. Chem.* 2010. Vol. 49. № 14. P. 6706–6715.
- 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.
- Wang N. Q., Zhao X., Li C.M. [and others]. Upconversion and color tunability in $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ doped low phonon energy bismuth tellurite glasses. *J. Lumin.* 2010. Vol. 130. P. 1044–1047.
- Курков А.С., Дианов Е.М. Непрерывные волоконные лазеры средней мощности. *Квантовая электроника.* 2004. Т. 34. № 10. С. 881–900.
- Halyan V.V., Kityk I.V., Kevshyn A.H., Ivashchenko I.A., Lakshminarayana G., Shevchuk M.V., Fedorchuk A., Piasecki M. Effect of temperature on the structure and luminescence properties of $\text{Ag}_{0.05}\text{Ga}_{0.05}\text{Ge}_{0.95}\text{S}_2\text{-Er}_2\text{S}_3$ glasses / *J. Lumin.* 2017. Vol. 181. P. 315–320.
- Kityk I.V., Halyan V.V., Yukhymchuk V.O., Strelchuk V.V., Ivashchenko I.A., Zhydachevskii Ya., Suchocki A., Olekseyuk I.D., Kevshyn A.G., Piasecki M. NIR and visible luminescence features of erbium doped $\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-La}_2\text{S}_3$ glasses. *J Non Cryst Solids.* 2018. Vol. 498. P. 380–385.
- Halyan V.V., Yukhymchuk V.O., Ivashchenko I.A., Kozak V.S., Tyshchenko P.V., Olekseyuk I.D. Synthesis and downconversion photoluminescence of Erbium-doped chalcogenide glasses of $\text{AgCl(I)-Ga}_2\text{S}_3\text{-La}_2\text{S}_3$ systems. *Applied Optics.* 2021. V. 60. P. 5285–5290.
- 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.
- Messaddeq S.H., Siu Li M., Lezal D., Raman investigation of structural photoinduced irreversible changes of $\text{Ga}_{10}\text{Ge}_{25}\text{S}_{65}$ chalcogenide glasses / [and others]. *J. Optoelectronics & Adv. Mater.* 2001. Vol. 3. P. 295–302.
- Halyan V.V., Strelchuk V.V., Yukhymchuk V.O. [and others]. 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.
- Frej M.L., Valdez E., de Araújo C.B. [and others]. Stokes and anti-Stokes luminescence of Er^{3+} doped $\text{Ga}_{10}\text{Ge}_{25}\text{S}_{65}$ glass excited at 980 and 532 nm. *J. Appl. Phys.* 2010. Vol. 108. P. 093514-1–093514-5.
- Ge Li, Li Lini, Xinyu Huang [and others]. Er^{3+} doped and $\text{Er}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ co-doped gallium-antimony-sulphur chalcogenide glasses for infrared applications. *Opt. Mater. Express.* 2016. Vol. 6. P. 3849–3856.
- J. Heo, W. Y. Cho, W. J. Chung. Sensitizing effect of Tm^{3+} on 2.9 μm emission from Dy^{3+} -doped $\text{Ge}_{25}\text{Ga}_5\text{S}_{70}$ glass / *J. Non Cryst. Solids.* 1997. Vol. 212(s2–3). P. 151–156.
- Tian Y., Xu R., Hu L., Zhang J. 2.7 μm fluorescence radiative dynamics and energy transfer between Er^{3+} and Tm^{3+} ions in fluoride glass under 800 nm and 980 nm excitation. *J Quant Spectrosc Radiat Transf.* 2012. Vol. 113. P. 87–95.
- Golding P. S., Jackson S. D., King T. A., Pollnau M. Energy transfer processes in Er^{3+} -doped and Er^{3+} , Pr^{3+} -codoped ZBLAN glasses. *Phys. Rev. B.* 2000. Vol. 62. P. 856–864.

REFERENCES:

1. Halyan V. V., Kevshin A. H., Davydyuk G. Ye., Shevchuk N. V. Mechanism of anti-stokes photoluminescence in $\text{Ag}_{0.05}\text{Ga}_{0.05}\text{Ge}_{0.95}\text{S}_2\text{-Er}_2\text{S}_3$ glassy alloys. *Glass Phys. Chem.* 2013. Vol. 39. P. 52–56.
2. Halyan V. V., Ivashchenko I. A., Kevshyn A. H., Oleksyuk I. D., Tishchenko P. V., Tretyak A. P. Growth of the $(\text{Ga}_{69.5}\text{La}_{29.5}\text{Er})_2\text{S}_{300}$ Single Crystal and Mechanism of Stokes Emission. *J. Nano- Electron. Phys.* 2019. Vol. 11. P. 01008-1–01008-4.
3. Asabina E.A. Defects in solids and their influence on the properties of functional materials. Nizhny Novgorod: NGU. 2012. p.65.
4. Lupan E. Emission spectra of $\text{Ge}_{25}\text{Ga}_{1.7}\text{As}_{8.3}\text{S}_{65}$ glass doped with Sm^{3+} and Nd^{3+} . *J Non-Oxide Glass.* 2009. V. 1, No. 3. P. 183–189.
5. Tver'yanovich Yu. S., Degtyarev S. V., Pivovarov S. S. [and others]. The environment of Nd^{3+} , Sm^{3+} , Yb^{3+} in chalcogenide glasses containing gallium and germanium. *J. Non Cryst. Solids.* 1999. Vol. 256–257. P. 95–99.
6. Zh. Xu, Kang X., Ch. Li [and others] Ln^{3+} ($\text{Ln} = \text{Eu}, \text{Dy}, \text{Sm}, \text{and Er}$) ion-doped YVO_4 nano/microcrystals with multiform morphologies: Hydrothermal synthesis, growing mechanism, and luminescent properties. *Inorg. Chem.* 2010. Vol. 49, № 14. P. 6706–6715.
7. 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.
8. Wang N. Q., Zhao X., Li C.M. [and others]. Upconversion and color tunability in $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ doped low phonon energy bismuth tellurite glasses. *J. Lumin.* 2010. Vol. 130. P. 1044–1047.
9. Kurkov A.S., Dianov E.M. Medium power continuous fiber lasers. *Quantum electronics.* 2004. V. 34, No. 10. pp. 881–900.
10. Halyan V. V., Kityk I. V., Kevshyn A. H. [and others]. Effect of temperature on the structure and luminescence properties of $\text{Ag}_{0.05}\text{Ga}_{0.05}\text{Ge}_{0.95}\text{S}_2\text{-Er}_2\text{S}_3$ glasses. *J. Lumin.* 2017. Vol. 181. P. 315–320.
11. Kityk I. V., Halyan V. V., Yukhymchuk V. O. [and others]. NIR and visible luminescence features of erbium doped $\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-La}_2\text{S}_3$ glasses. *J Non Cryst Solids.* 2018. Vol. 498. P. 380–385.
12. Halyan V.V., Yukhymchuk V.O., Ivashchenko I.A. [and others]. Synthesis and downconversion photoluminescence of Erbium-doped chalcogenide glasses of $\text{AgCl(I)-Ga}_2\text{S}_3\text{-La}_2\text{S}_3$ systems. *Applied Optics.* 2021. V. 60, P. 5285–5290.
13. 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.
14. Messaddeq S. H., Siu Li M., Lezal D. Raman investigation of structural photoinduced irreversible changes of $\text{Ga}_{10}\text{Ge}_{25}\text{S}_{65}$ chalcogenide glasses. *J. Optoelectronics & Adv. Mater.* 2001. Vol. 3. P. 295–302.
15. Halyan V. V., Strelchuk V. V., Yuhymchuk V. O. [and others]. 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.
16. Frej M. L., Valdez E., de Araújo C. B. [and others]. Stokes and anti-Stokes luminescence of Er^{3+} doped $\text{Ga}_{10}\text{Ge}_{25}\text{S}_{65}$ glass excited at 980 and 532 nm. *J. Appl. Phys.* 2010. Vol. 108. P. 093514-1–093514-5.
17. Ge Li, Li Lini, Xinyu Huang [and others]. Er^{3+} doped and $\text{Er}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ co-doped gallium-antimony-sulphur chalcogenide glasses for infrared applications. *Opt. Mater. Express.* 2016. Vol. 6. P. 3849–3856.
18. J. Heo, W. Y. Cho, W. J. Chung. Sensitizing effect of Tm^{3+} on 2.9 μm emission from Dy^{3+} -doped $\text{Ge}_{25}\text{Ga}_5\text{S}_{70}$ glass. *J. Non Cryst. Solids.* 1997. Vol. 212(s2–3). P. 151–156.
19. Tian Y., Xu R., Hu L., Zhang J. 2.7 μm fluorescence radiative dynamics and energy transfer between Er^{3+} and Tm^{3+} ions in fluoride glass under 800 nm and 980 nm excitation. *J Quant Spectrosc Radiat Transf.* 2012. Vol. 113. P 87–95.
20. Golding P. S., Jackson S. D., King T. A., Pollnau M. Energy transfer processes in Er^{3+} -doped and Er^{3+} , Pr^{3+} -codoped ZBLAN glasses. *Phys. Rev. B.* 2000. Vol. 62, P. 856–864.