

ОСОБЛИВОСТІ ЛЮМІНЕСЦЕНЦІЇ ПОЛІСТИРОЛЬНОГО КОМПОЗИТА З ВКРАПЛЕНИМИ НАНОЧАСТИНКАМИ $YVO_4:Eu$

Т. М. Демків, О. О. Галяткін, М. О. Чилій, Т. Малий, В. В. Вістовський,
Л. І. Булик, Л. С. Демків, А. С. Волошиновський
*Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. Кирила і Мефодія, 8, 79005 Львів, Україна
e-mail: tmdemkiv@gmail.com*

(Отримано 14 червня 2018 р.; в остаточному вигляді — 10 жовтня 2018 р.)

Досліджено люмінесцентно-кінетичні характеристики наночастинок $YVO_4:Eu$ та композитів на основі полістирольного сцинтилятора з вкрапленими наночастинами $YVO_4:Eu$. З'ясовано, що інтенсивність рентгенолюмінесценції полістирольних композитів із вкрапленими наночастинами $YVO_4:Eu$ (40 ваг.%) зростає втричі. Збільшення ефективності реєстрації йонізуювального випромінювання нанокompозита зумовлено передачею енергії збудження від вкраплених наночастинок $YVO_4:Eu$ до полістирольної матриці за рахунок емісії електронів із наночастинок $YVO_4:Eu$ у полістирольну матрицю. Ефективність цього механізму значно послаблюється за рахунок агрегування наночастинок.

Ключові слова: спектри люмінесценції, довжина термалізації, довжина вільного пробігу, полістирольний композит, наночастинка.

DOI: <https://doi.org/10.30970/jps.22.4301>

PACS number(s): 32.50.+d, 78.67.Bf, 81.05.Qk

I. ВСТУП

На сьогодні розроблено ефективні неорганічні сцинтилятори на основі галоїдів лантанідів, активованих йонами церію ($LaCl_3-Ce$, $LaBr_3-Ce$, LuI_3-Ce [1]), та галоїдів лужноземельних металів, активованих йонами Європію ($MeI-Eu^{2+}$, $Me=Ca, Sr, Ba$ [2, 3]), які забезпечують світлові виходи 60–100000 ph/MeV, тривалості сцинтиляційних імпульсів — 30–800 нс та значну поглинальну здатність високоенергетичного випромінювання через великий ефективний порядковий номер Z_{eff} . Загальним недоліком згаданих неорганічних сцинтиляторів є їхня гігроскопічність та велика ціна одиниці продукції. Альтернативою неорганічним можуть бути пластмасові сцинтилятори, для яких властиві негігроскопічність, задовільні світловиходи 10000 ph/MeV та висока швидкодія (~3 нс). Крім цього пластмасові сцинтилятори дешевші від неорганічних і можуть мати довільну форму та розміри. Однак поглинальна здатність таких сцинтиляторів незначна через мале зарядове число ($Z_{eff} \sim 6$). Поліпшення поглинальної здатності полімерних сцинтиляторів може бути здійснене за рахунок уведення в полістирольну матрицю неорганічних наночастинок з великим Z_{eff} . Про успішне створення пластмасових сцинтиляторів, наповнених неорганічними наночастинами на основі сполук барію, стронцію, кальцію, гафнію, вісмуту, гадолінію, повідомлялось у [4–9].

Дослідження люмінесцентних властивостей неорганічних наноматеріалів показало, що їхні властивості суттєво залежать від розмірів. Зокрема встановлено пороговий характер гасіння люмінесценції автолокалізованих екситонів у неорганічних наночастинках BaF_2 [4], SrF_2 [5], CaF_2 [6]. Якщо за оптичного збу-

дження у гасінні люмінесценції суттєву роль відіграють процеси перенесення енергії від збуджених станів до дефектів на поверхні наночастинок, то у випадку високоенергетичного збудження суттєвим чинником стають процеси електрон-електронного розсіяння та термалізації електронів на фонах кристалічної ґратки. Якщо довжина термалізації $l_{e,ther}$ чи довжина вільного пробігу електронів $l_{e,e}$ перевершують розмір наночастинок, інтенсивність їхньої рентгенолюмінесценції суттєво зменшується [6].

У роботі [10] розраховано інтенсивності рекомбінаційної люмінесценції від розміру наночастинок. Виявилось, що оксидні неорганічні наночастилки мають значно коротші довжини термалізації порівняно з фторидними наночастинками. З погляду використання наночастинок як джерел люмінесценції, наночастилки $YVO_4:Eu$ мають переваги. Середня довжина термалізації електронів у YVO_4 становить ~6 нм [11] і є значно меншою за таку в наночастинках сполук фторидів (~70 нм і більше). Якщо розмір наночастинок менший за довжину термалізації електронів, то останні будуть виходити за межі наночастинок і не братимуть участі в рекомбінаційній люмінесценції всередині наночастинок. Спостерігатиметься гасіння люмінесценції через брак електронів у середині наночастинок. Однак, якщо наночастилки помістити в полістирол, який має люмінесцентні домішки п-терфеніл та РОРОР (1,4-bis (5-phenyloxazol-2-yl) benzene), то такий полімерний композит демонструватиме суттєво більшу люмінесценцію за полістирольний сцинтилятор без наночастинок. Фотоелектрони не братимуть участі в рекомбінаційній люмінесценції в об'ємі наночастинок, але передаватимуть свою енергію полістирольній матриці [4–6].

Інтерес до вивчення люмінесцентних властивостей полістиролу з наночастинками $YVO_4:Eu$ зумовлений особливостями люмінесценції $YVO_4:Eu$. У попередньо вивчених наноконструктивних сцинтиляторах на основі MeF_2 [4, 5], крім збудження полістирольної матриці електронами, які покинули наночастинки, існує додатковий канал, зумовлений перенесенням світлення автолокалізованих екситонів (АЛЕ) до активатора полістирольної матриці *p*-терфенілу. Це відбувається через те, що смуга люмінесценції АЛЕ з максимумом на 300 нм перекривається смугою поглинання активатора полістиролу *p*-терфенілу. Остання обставина не дозволяє чітко оцінити вклад у люмінесценцію полістиролу від електронів, що покинули наночастинку. У випадку $YVO_4:Eu$ смуга люмінесценції Європію розташована на 620 нм, далеко від смуг поглинання активаторів полістиролу *p*-терфенілу (380 нм) та РОРОР (420 нм). Тобто люмінесценція Eu^{3+} -центрів не передаватиметься активаторам полістиролу. Ця особливість світлення $YVO_4:Eu$ дозволяє оцінити за інтенсивністю люмінесценції полістиролу та Eu^{3+} -центрів розподіл поглинутої наночастинками енергії високоенергетичного випромінювання: на виліт електронів за межі наночастинки та збудження люмінесценції Eu^{3+} -центрів.

II. МЕТОДИ ОТРИМАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ НАНОКОМПОЗИТІВ

A. Синтез наночастинок

Наночастинки $YVO_4:Eu$ (5 ваг.% Eu) синтезували з розчинів солей $Y(NO_3)_3 \cdot 4H_2O$ та $NaVO_3 \cdot Y(NO_3)_3 \cdot 4H_2O$ і розчиняли в дистильованій воді. До розчину додавали $EuCl_3 \cdot 6H_2O$. $NaVO_3$ і розчиняли в одномолярному водному розчині $NaOH$ до $pH = 11.5$. Для отримання наночастинок менших розмірів водний розчин цитрату $Na_3C_6H_5O_7 \cdot 2H_2O$ по крапельно додавали до водної суміші $Y(NO_3)_3 \cdot 4H_2O$ та $EuCl_3 \cdot 6H_2O$, температура якої дорівнювала $70^\circ C$, інтенсивно перемішуючи магнітною мішалкою. Після цього до отриманої суміші по крапельно додавали розчин $NaVO_3$, безперервно помішуючи та підігрівуючи. Додаванням водного розчину аміаку доводили pH отриманої суміші до 9.5. Після цього посудину з сумішшю щільно закривали для запобігання випаровуванню і витримували при температурі $85^\circ C$ протягом 1 години. Одержаний мутний розчин діалізували з використанням мембрани 6–8 кДа протягом декількох годин. Після діалізу прозорий розчин висушували під витяжкою. Отриманий порошок використовували для люмінесцентних досліджень.

Фазовий склад та розмір наночастинок $YVO_4:Eu$ визначали з рентгеноструктурних досліджень. Дифрактограма (рис. 1) показує гомогенність наночастинок $YVO_4:Eu$. Розрахований за формулою Шерера середній розмір свіжоотриманих наночастинок становив 8 нм. Відпал за температури $800^\circ C$ протягом

2 годин приводив до збільшення середнього розміру наночастинок до 16 нм.

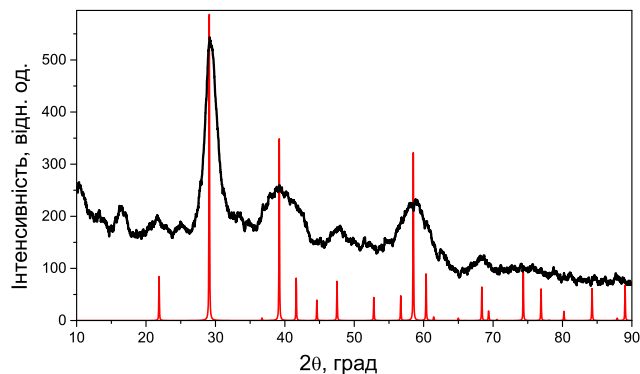


Рис. 1. Дифрактограма наночастинок $YVO_4:Eu$, відпалених за температури $800^\circ C$.

B. Виготовлення полістирольних плівок

Композитні плівки виготовляли зі стружки полістирольного сцинтилятора виробництва Інституту сцинтиляційних матеріалів НАН України (м. Харків), яка містить органічні люмінесцентні домішки *p*-терфеніл (активатор) та РОРОР (змішувач спектра) у кількості 2 ваг.% та 0.1 ваг.% відповідно. Стружку полістирольного сцинтилятора розчиняли в суміші $C_2H_4Cl_2 + CCl_4$ (дихлоретан + тетрахлорметан). Після розчинення полістиролу до суміші додавали наночастинки $YVO_4:Eu$ (40 ваг.%). Для досягнення рівномірного розподілу наночастинок у розчині полістиролу суміш піддавали дії ультразвуку. У результаті дії ультразвуку потужністю 150 Вт протягом 15 хв отримували безбарвну, повністю прозору суспензію наночастинок у полістирольному розчині. Для формування композитних плівок одержану суспензію наносили краплями на предметне скло. Плівку витримували протягом доби до повного випаровування розчинника. Для люмінесцентних досліджень використовували зразки плівкових композитів діаметром 10 мм та товщиною 0.3 мм.

C. Вимірювання параметрів рентгенолюмінесценції

Вимірювали спектри люмінесценції й кінетики загасання люмінесценції наночастинок $YVO_4:Eu$ та полімерних композитів із вкрапленими наночастинками $YVO_4:Eu$ за імпульсного збудження рентгенівськими квантами на установці на базі дифракційного монохроматора МДР-2 з дисперсією 2 нм/мм. Установа дозволяє проводити люмінесцентно-кінетичні вимірювання в часовому інтервалі 10^{-9} – 10^{-3} с та спектральному діапазоні 200–800 нм. Анодна напруга на рентгенівській трубі становила $U = 40$ кВ, середній

струм — 10–600 мкА, тривалість імпульсу — 2 нс [12], середня енергія рентгенівських квантів — 23 кеВ.

Люмінесцентні спектральні дослідження проводили на лабораторному обладнанні, змонтованому на основі монохроматорів МДР-2 (для виділення довжини хвилі збуджувального світла) та МДР-12 (для запису спектра люмінесценції). Для вимірювання спектрів люмінесценції та збудження люмінесценції за джерело збудження використовували дейтерієву лампу ЛДД-400. Реєстрували люмінесцентне світло за допомогою фотопомножувача ФЭУ-100 у режимі ліку одиночних фотонів.

Досліджували кінетику загасання в наносекундному й міросекундному діапазонах з використанням лампи іскрового розряду з тривалістю імпульсу близько 2 нс. Реєстрацію кінетики здійснювали статистичним методом ліку одиночних квантів. Досліджуючи кінетику люмінесценції мілісекундного діапазону, за джерело збудження використовували світлодіоди з різними довжинами хвиль випромінювання.

Усі вимірювання проводили за кімнатної температури.

III. ЕКСПЕРИМЕНТ І ОБГОВОРЕННЯ

Люмінесценція полістирольного сцинтилятора без наночастинок за рентгенівського збудження (рис. 2, крива 1) виявляє слабкі максимуми на 370 нм та на 420 нм, характерні для свічення люмінесцентних домішок п-терфінілу та РОРОР.

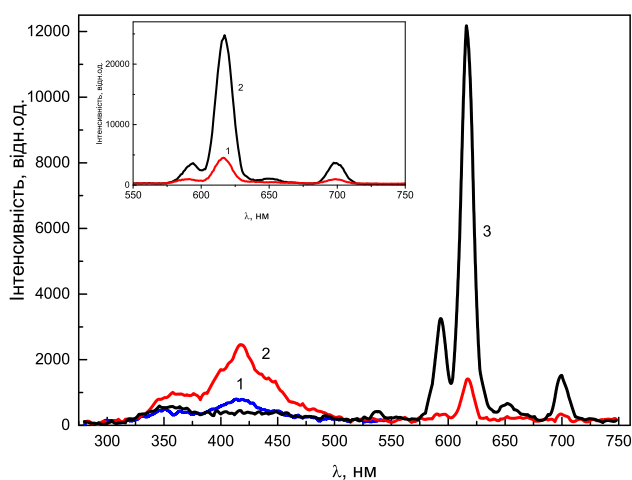


Рис. 2. Спектри рентгенолюмінесценції: 1 — полімерного сцинтилятора без наночастинок; 2 — полімерного композита з наночастинами $YVO_4:Eu$ (середній розмір 8 нм, 40 ваг.%); 3 — полімерного композита з наночастинами $YVO_4:Eu$ (середній розмір 16 нм, 40 ваг.%). На вставці — спектри люмінесценції за рентгенівського збудження наночастинок $YVO_4:Eu$ з різним середнім розміром: 1 — 8 нм; 2 — 16 нм.

Люмінесценція полістирольного нанокompозита з вкрапленими наночастинами $YVO_4:Eu$ (40 ваг.%) (крива 2) містить смуги, характерні як для свічення люмінесцентних домішок п-терфініл (370 нм) та РОРОР (420 нм), так і для Eu^{3+} -центрів у наночастинках $YVO_4:Eu$ (основні смуги $^5D_0 \rightarrow ^7F_1$ при 590 нм і $^5D_0 \rightarrow ^7F_2$ при 617 нм, та слабші смуги $^5D_0 \rightarrow ^7F_3$ (590 нм) і $^5D_0 \rightarrow ^7F_4$ (700 нм)) [13]. Зазначимо, що інтенсивність люмінесценції смуг 360 та 420 нм полістирольного сцинтилятора без наночастинок та полістирольного композита, який містить наночастинок розміром 16 нм, є порівняльна. За зменшення розміру вкраплених в полістирольну матрицю наночастинок $YVO_4:Eu$ від 16 до 8 нм зростає інтенсивність смуг свічення полістирольної матриці та спадає інтенсивність смуг, які відповідають люмінесценції йонів Eu^{3+} наночастинок $YVO_4:Eu$. Зменшення інтенсивності свічення Європію у полістирольному композиті збігається зі зменшенням інтенсивності люмінесценції йонів Eu^{3+} у наночастинках $YVO_4:Eu$ зі зменшенням їхнього розміру від 16 до 8 нм (рис. 2, вставка).

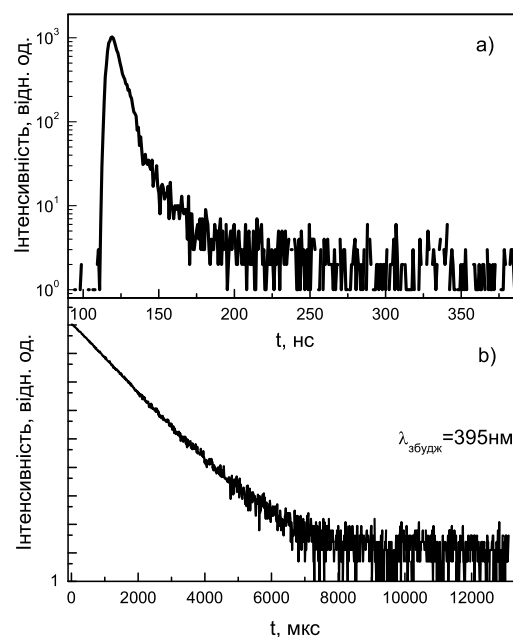


Рис. 3. Кінетика загасання люмінесценції полістирольного композита з вкрапленими наночастинами $YVO_4:Eu$ (16 нм, 40 ваг.%): а — за рентгенівського, б — за оптичного збудження ($\lambda_{збудж} = 395$ нм).

Кінетика загасання люмінесценції полістирольного композита у випадку рентгенівського опромінення (рис. 3,а), виміряна в інтегральному режимі, відтворює кінетику загасання полістирольного сцинтилятора з константою загасання $\sim 2,7$ нс. За реєстрації сцинтиляційного імпульсу в часовому вікні 500 нс внесок у криву загасання від люмінесценції Eu^{3+} -центрів не реєструється. Це є наслідком того, що інтенсивність рекомбінаційної люмінесценції Eu^{3+} -центрів у наночастинках $YVO_4:Eu$ значно менша за інтенсивність смуг випромінювання полістиролу, а час загасання люмінесценції Європію становить

0,8 нс (рис. 3,б). Таке значення часу загасання (нс) значно виходить за межі часового інтервалу реєстрації сцинтиляційного імпульсу полістирольного композита (500 нс).

Спостережувані властивості можна пояснити на основі особливостей сцинтиляційного механізму за умови просторового обмеження, а саме, враховуючи можливість виходу електронів за межі наночастинок [6, 12, 14]. Визначальним тут є співвідношення між довжиною вільного пробігу електронів ($l_{e,e}$), довжиною термалізації електронів ($l_{e,ther}$) та розмірами наночастинок (a).

У нанокompозитному сцинтиляторі йонізувальне випромінювання, здебільшого, поглинається неорганічними наночастинами полістирольного композита. Це зумовлено тим, що ефективне зарядове число $Z_{eff} \approx 56$ неорганічної наночастинок є значно більшим від $Z_{eff} \approx 6$ органічної матриці. Під дією йонізувального випромінювання в наночастиці виникають високоенергетичні фотоелектрони, які за певних умов можуть її покинути. Зокрема це відбувається, якщо довжина вільного пробігу або довжина термалізації електронів є більшими за середній розмір наночастинок. Довжина вільного пробігу електронів визначається розсіянням фотоелектронів на валентних електронах і може бути знайдена з універсальної кривої електрон-електронного розсіяння. Для фотоелектронів з енергією 23 кеВ довжина вільного пробігу становить ~ 8 нм [15]. Зазначимо, що наночастинок $YVO_4:Eu$ мають сумірні довжину вільного пробігу ($l_{e,e} \approx 8$ нм) та довжину термалізації електрона ($l_{e,ther} \approx 6$ нм) [11].

Якщо розмір наночастинок $YVO_4:Eu$ сумірний або менший за $l_{e,e}$ та $l_{e,ther}$, то енергія збудження йонізувального випромінювання може передаватися до полістирольної матриці безвипромінювальним шляхом — через емісію електронів з наночастинок $YVO_4:Eu$ у полістирольну матрицю. Відповідно, електрони не зможуть рекомбінувати з центрами випромінювання всередині наночастинок $YVO_4:Eu$, і люмінесценція йонів европію в наночастинках розміром 8 нм та менше буде суттєво зменшуватись, як це видно з (рис. 2). За таких умов переважатиме люмінесценція полістирольної матриці і люмінесцентні параметри нанокompозита мають відтворювати параметри полістирольної матриці. Справді, час загасання нанокompозита ($\sim 2,7$ нс) відтворює параметри сцинтиляційного імпульсу полістирольної матриці (рис. 3,а).

Оскільки випромінювальна здатність нанокompозиту визначається енергією, поглинутою наночастинами, то оцінка поглинальної здатності наночастинок і полістиролу дозволяє оцінити ефективність композитного сцинтилятора. Якщо композит представити як сукупність послідовно розміщених шарів YVO_4 та полістиролу з товщинами d_{YVO_4} та d_{PS} , відповідно, то коефіцієнт атенюації полістирольного композиту матиме вид:

$$\alpha = \frac{\alpha_{YVO_4} d_{YVO_4} + \alpha_{PS} d_{PS}}{d_{YVO_4} + d_{PS}}. \quad (1)$$

З урахуванням числових значень коефіцієнтів поглинання для $\alpha_{YVO_4} = 100.54 \text{ см}^{-1}$ та $\alpha_{PS} = 0.436 \text{ см}^{-1}$ [16] розраховане за виразом (1) поглинання полістирольного композита товщиною 0.3 мм з вкрапленими наночастинами $YVO_4:Eu$ (40 ваг.%) порівняно з полістирольною плівкою без наночастинок тієї ж товщини зростає в 33 рази. Відповідно можна очікувати зростання інтенсивності рентгенолюмінесценції такого композита в 33 рази. Однак інтенсивність рентгенолюмінесценції полістирольного композиту (рис. 2) зростає тільки у 3.4 раза. Причиною невідповідності може бути агрегація наночастинок $YVO_4:Eu$. У такому випадку електрони, які вилітають з наночастинок під дією рентгеновського випромінювання, значною мірою знову попадають в інші наночастинок, а не в полістирольну матрицю.

Наночастинок $YVO_4:Eu$ в полістирольному нанокompозиті поглинають енергію рентгеновського опромінення, одна частина якої передається полістирольній матриці за механізмом зовнішнього фото ефекту через виліт електронів з наночастинок у полістирольну матрицю (безвипромінювальний канал), а друга витрачається на власну люмінесценцію Eu^{3+} -центрів наночастинок $YVO_4:Eu$ (випромінювальний канал). За інтенсивністю смуг люмінесценції полістирольного композита з вкрапленими наночастинами $YVO_4:Eu$ можна оцінити, яка частка поглинутої наночастинами енергії рентгеновського випромінювання витрачається на випромінювальний, а яка на безвипромінювальний канали передачі енергії. Зазначимо, що сумарна інтенсивність випромінювання у смугах люмінесценції полістиролу та европію для композита з наночастинами різних розмірів (8 та 16 нм) є однаковою. Відбувається тільки перерозподіл між випромінювальним та безвипромінювальним каналами перенесення енергії. У полістирольному композиті з вкрапленими наночастинами розміром 8 нм 70% енергії, поглинутої наночастинами, передається безвипромінювальним каналом, 30% — випромінювальним. У випадку наночастинок розміром 16 нм на канали припадає 26% та 74% енергії відповідно.

IV. ВИСНОВКИ

Синтезовано наночастинок $YVO_4:Eu$ й отримано композитні плівки на основі сцинтиляційного полістиролу з вкрапленими наночастинами $YVO_4:Eu$ (40 ваг.%). За рентгеновського збудження спостерігаємо зростання інтенсивності люмінесценції полістирольного нанокompозита порівняно з люмінесценцією полістирольної плівки без наночастинок зі збереженням часу висвічування полістирольного сцинтилятора (~ 2.7 нс). Зростання інтенсивності люмінесценції нанокompозита зумовлено збільшенням його поглинаючої здатності порівняно з полістирольною матрицею через наявність у ньому неорганічних наночастинок $YVO_4:Eu$. Невідповідність між розрахованою та спостережуваною ефективністю детектування нанокompозита може бути зумовлена агрегуванням наночастинок, яке перешкоджає вильоту електронів з наночастинок у полістирольну матрицю.

-
- [1] P. Dorenbos, R. Menge, V. Ouspenski, K. Kramer, patent US20140117242A1 (2014).
 [2] E. Loef, K. Shah, J. Glodo, patent US20100268074A1 (2010).
 [3] S. Payne, N. Cherepy, G. Hull, A. Drobshoff, patent US8580149B2 (2013).
 [4] T. Demkiv, O. Halyatkin, V. Vistovskyy, A. Gektin, A. Voloshinovskii, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **810**, 1 (2016).
 [5] O. Halyatkin *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **847**, 47 (2017).
 [6] V. Vistovskyy *et al.*, Appl. Phys. **112**, 024325 (2012).
 [7] B. L. Rupert, N. J. Cherepy, B. W. Sturm, R. D. Sanner, S. A. Payne, Europhys. Lett. **97**, 22002 (2012).
 [8] Y. Sun *et al.*, Appl. Phys. Lett. **104**, 174104 (2014).
 [9] L. Ovechkina, K. Riley, S. Miller, Z. Bell, V. Nagarkar, Phys. Proc. **2**, 161 (2009).
 [10] V. Vistovskyy *et al.*, Radiat. Meas. **90**, 174 (2016).
 [11] M. Chylii *et al.*, J. Phys. Stud. **22**, 1301 (2018).
 [12] V. Vistovskyy *et al.*, J. Appl. Phys. **116**, 054308 (2014).
 [13] L. Shirmane, C. Feldmann, V. Pankratov, Phys. B **504**, 80 (2017).
 [14] T. Demkiv *et al.*, J. Lumin. **190**, 10 (2017).
 [15] M. Seah, W. Dench, Surf. Interface Anal. **1**, 2 (1979).
 [16] <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/ComTab/polystyrene.html>.

LUMINESCENCE PECULIARITIES OF POLYSTYRENE COMPOSITE WITH EMBEDDED YVO₄:Eu NANOPARTICLES

T. Demkiv, O. Halyatkin, M. Chylii, T. Malyi, V. Vistovsky, L. Bulyk, L. Demkiv, A. Voloshinovskii
Ivan Franko National University of Lviv,
8, Kyryla i Mefodiya St., Lviv, UA-79005, Ukraine
tmdemkiv@gmail.com

8nm and 16 nm YVO₄:Eu nanoparticles have been synthesized by the low temperature chemical method and annealed at $T = 800^{\circ}\text{C}$. The nanocomposite films based on scintillation polystyrene loaded with YVO₄:Eu (40 wt%) nanoparticles have been obtained. The luminescence-kinetic characteristics of YVO₄:Eu nanoparticles and nanocomposites have been investigated. The luminescence of the polystyrene nanocomposite loaded with YVO₄:Eu (40 wt%) nanoparticles reveals the bands characteristic of the luminescent impurities of p-Terpinil (370 nm), POPOP (420 nm) and of YVO₄:Eu nanoparticles (⁵D₀ → ⁷F₁ band) at 590 nm, the band ⁵D₀ → ⁷F₂ at 617 nm, and the weaker ⁵D₀ → ⁷F₃ (590 nm) and ⁵D₀ → ⁷F₄ (700 nm) bands. The intensity of X-ray excited luminescence of the polystyrene composites loaded with YVO₄:Eu nanoparticles (40 wt%) increases 3 times. The luminescence decay kinetic of the polystyrene composite in the case of X-ray excitation reproduces the decay kinetic curve of pure polystyrene scintillator with the time constant of ~2.7 ns. The contribution of Eu³⁺ luminescence to the scintillation pulse is insignificant due to the significant decrease of the luminescence intensity of Eu³⁺ centers with decreasing nanoparticle sizes, and the decay time constant of Eu³⁺ luminescence ($\tau = 0.8$ ms) is significantly greater than the duration of the main scintillation pulse.

The increase in the detection efficiency of the ionizing radiation by the nanocomposite is caused by the increase in the absorption capacity. The increase in absorption is caused by the presence of heavy inorganic YVO₄:Eu nanoparticles compared to the polystyrene matrix without any nanoparticles and by the transfer of excitation energy from embedded nanoparticles to the polystyrene matrix due to the electron escape from YVO₄:Eu nanoparticles into the host matrix. The discrepancy between the calculated and observed efficiency detection for the nanocomposite is due to the aggregation of nanoparticles, which prevents the escape of electrons from nanoparticles into the polystyrene matrix.