

**Люмінесцентний відгук кристалу  $\text{YAP:Mn}$  на дію іонізувального та оптичного випромінювання**

**Шифр «Відгук»**

## АНОТАЦІЯ

Метою цієї роботи є встановлення особливостей люмінесцентного відгуку кристалів YAP:Mn, викликаного іонізівнім та оптичним випромінюванням, можливості розділення оптично-стимульованої люмінесценції (ОСЛ) від післясвічення кристалу, а також встановлення можливості та особливостей оптичного стирання залишкового дозиметричного сигналу. Це дослідження є частиною більшого комплексного проєкту, кінцевим результатом буде розроблення вітчизняної пасивної дозиметричної системи на основі YAP:Mn та явища ОСЛ.

Для виконання експериментальних досліджень було розроблене, виготовлене та апробоване допоміжне обладнання, зокрема пристосування для точного позиціонування зразків при опроміненні іонізівнім випромінюванням, таймер експозиції, макет для стирання дозиметричного сигналу оптичним способом. Проведені дослідження вказують на те, що післясвічення в кристалі YAP:Mn виникає як після опромінення X-променями, так і після дії світла видимого діапазону. Його загасання дуже точно описується емпіричним законом загасання Бекереля в інтервалі часу свічення до  $10^5$  с, причому степінь гіперболи є меншою за 1. З іншого боку сигнал ОСЛ в інтервалі 50-350 мс після стимулювання видимим світлом має експоненційну кінетику загасання. Експерименти з оптичного стирання доводять можливість як стимулювання ОСЛ, так і стирання залишкового дозиметричного сигналу синім (470 нм), зеленим (530 нм) та червоним (660 нм) світлом, причому в усіх випадках зменшення інтенсивності ОСЛ відбувається за експонентою. Встановлена залежність дозволяє за початковим рівнем сигналу визначити необхідний час для регенерації дозиметричних детекторів оптичним способом.

<b>Зміст</b>	
<b>ВСТУП</b> .....	<b>2</b>
<b>РОЗДІЛ 1. МІСЦЕ ЛЮМІНЕСЦЕНТНОЇ ДОЗИМЕТРІЇ ТА МЕТОДУ ОСЛ У СУЧАСНОМУ РАДІАЦІЙНОМУ КОНТРОЛІ ОПРОМІНЕННЯ</b> ...	<b>3</b>
1.1 Короткі відомості про принципи вимірювання ОСЛ .....	3
1.2 Особливість люмінесцентних методів у пасивній дозиметрії .....	4
<b>РОЗДІЛ 2. ВІДОМОСТІ ПРО КРИСТАЛИ <math>YAP:Mn</math> ТА ЙОГО ДОЗИМЕТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ</b> .....	<b>6</b>
<b>РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ТА СТВОРЕННЯ ДОПОМІЖНОГО ОБЛАДНАННЯ</b> .....	<b>11</b>
3.1 Макет для вимірювання ОСЛ та особливості методу .....	11
3.2 Зразки для дослідження .....	14
3.3 Опромінення зразків X-променями .....	15
3.4 Розроблення макету оптичного стирача ОСЛ відгуку .....	17
3.5 Розроблення макету таймера експозиції .....	17
3.6 Методика вимірювань ОСЛ та післясвічення .....	18
<b>РОЗДІЛ 4. ЛЮМІНЕСЦЕНТНИЙ ВІДГУК <math>YAP:Mn</math> ВНАСЛІДОК ОПРОМІНЕННЯ X-ПРОМЕНЯМИ ТА ВИДИМИМ СВІТЛОМ</b> .....	<b>20</b>
4.1. Післясвічення, викликане опроміненням X-променями .....	20
4.2. Оптично-стимульована люмінесценція .....	24
4.3. Особливості процесу оптичного стирання сигналу ОСЛ .....	26
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	<b>29</b>
<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА</b> .....	<b>31</b>

## ВСТУП

Вже більше двадцяти років розвивається оптично-стимульована люмінесцентна дозиметрія (ОСЛД) – один з методів люмінесцентної пасивної дозиметрії. Попри суттєві переваги ОСЛД над більш традиційними методами пасивної дозиметрії на ринку існує всього два комерційно успішні матеріали оптично-стимульованої люмінесценції (ОСЛ):  $\text{Al}_2\text{O}_3$  і  $\text{BeO}$ , хоча і вони мають свої недоліки. Поява нових конкурентоспроможних матеріалів для ОСЛД стримується необхідністю розроблення спеціальних вимірювальних систем як для дослідження, так і для застосування у дозиметрії, пристосованих до конкретного матеріалу. Один з привабливих для дозиметрії матеріалів, що володіє явищем ОСЛ і який уже тривалий час досліджується у Національному університеті «Львівська політехніка» є ітрій-алюмінієвий перовськіт ( $\text{YAP} - \text{YAlO}_3$ ), активований марганцем ( $\text{YAP:Mn}$ ), а в останні роки виконується кілька проєктів для створення прототипу вітчизняної пасивної дозиметричної системи на основі цього матеріалу та методу ОСЛ. Попередниками було показано, що кристали на основі  $\text{YAP:Mn}$  володіють характеристиками, привабливими для люмінесцентної дозиметрії, у тому числі методом ОСЛ. Однак дослідження  $\text{YAP:Mn}$  як дозиметричного матеріалу проводилися здебільшого методом термо-стимульованої люмінесценції, а докладні дослідження способу зчитування дозиметричного відгуку методом ОСЛ, як і способів оптичного стирання залишкового сигналу для регенерації та повторного використання дозиметричних детекторів, систематично та *комплексно* не проводилися.

Дана робота виконувалася у межах розроблення прототипу дозиметричної системи для пасивної дозиметрії іонізівного випромінювання і мала на меті встановити особливості люмінесцентного відгуку кристалів  $\text{YAP:Mn}$ , викликаного іонізівним та оптичним випромінюванням, способів розділення відгуку ОСЛ від післясвічення кристалу, а також встановлення можливості та особливостей оптичного стирання залишкового дозиметричного сигналу.

# **РОЗДІЛ 1. МІСЦЕ ЛЮМІНЕСЦЕНТНОЇ ДОЗИМЕТРІЇ ТА МЕТОДУ ОСЛ У СУЧАСНОМУ РАДІАЦІЙНОМУ КОНТРОЛІ ОПРОМІНЕННЯ**

Поле застосування люмінесцентних методів дозиметрії, в основному, замикається на пасивній/накопичувальній дозиметрії, яка є одним із основних видів радіаційного контролю зовнішнього професійного опромінення осіб, що працюють з джерелами іонізуючого випромінювання (ІВ). Суть пасивної дозиметрії полягає у вимірюванні поглиненої дози, зазвичай у Греях (Гр) або Зівертах (Зв). Величина поглиненої дози є мірою впливу ІВ на живий організм. Попри те, що вплив ІВ на живі організми не до кінця вивчений, є встановлені як гранично допустимі рівні поглиненої дози, так і значення поглинених доз, що викликають ті чи інші порушення здоров'я аж до летальних наслідків.

## **1.1 Короткі відомості про принципи вимірювання ОСЛ**

Накопичення дози в люмінесцентній дозиметрії реалізується через властивість поглинати енергію ІВ. Поглинання відбувається за рахунок дефектів, які існують в дозиметричному матеріалі генетично або створені штучно легуванням під час синтезу матеріалу. Ці дефекти можуть виступати пастками електронів або дірок, різної глибини залягання по відношенню до зон провідності чи валентної зони, а також центрами рекомбінації чи центрами свічення. Найбільший інтерес становлять так звані дозиметричні пастки, які є метастабільними за кімнатної температури і дозволяють утримувати захоплені пастками носії тривалий час. Щоб звільнити носії заряду з таких пасток потрібна певна енергія, яка може бути передана або термічною активацією при нагріванні, або дією оптичного випромінювання. У цих випадках говорять відповідно про термоствимульовану люмінесценцію (ТСЛ) або просто термолюмінесценцію (ТЛ) та оптично-ствимульовану люмінесценцію (ОСЛ). Схема перебігу явища ОСЛ ілюструє рис. 1.1 [1].

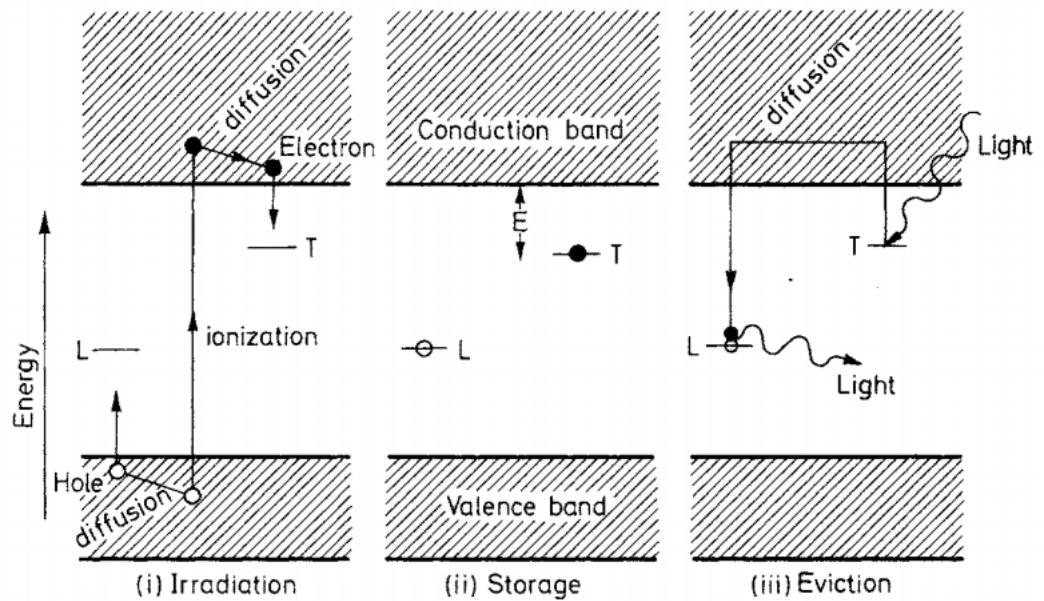


Рис. 1.1 Демонстрація енергетичних рівнів в процесі ОСЛ.

(i) Опромінення і заселення електронних (Т) та діркових (L) пасток внаслідок іонізації. (ii) Зберігання, де  $E$  глибина залягання пастки відносно зони провідності. (iii) Звільнення внаслідок збудження і рекомбінація з випромінюванням світла [1].

Дане випромінювання, яке називають відгуком ОСЛ, реєструється фотоелектронним помножувачем (ФЕП). Однак не все випромінювання може нести дозиметричну інформацію. Реальні матеріали мають багаторівневу структуру пасток, і при рекомбінації носіїв з таких, можуть вносити небажаний вклад у відгук ОСЛ. Тому дозиметричний матеріал має бути добре вивченим і усі чинники, що беруть участь чи впливають на формування його люмінесцентного відгуку повинні бути відомі для його застосування в дозиметрії.

## 1.2 Особливість люмінесцентних методів у пасивній дозиметрії

Інструментом пасивної дозиметрії є пасивний дозиметр, основою якого є ТЛ/ОСЛ дозиметричний матеріал (детектор) у вигляді монокристалу або полікристалічної кераміки. ТЛ/ОСЛ дозиметри не потребують енергоживлення,

є компактними та легкими, недорогими у порівнянні з активними дозиметрами-радіометрами. Найяскравішим прикладом є ОСЛ дозиметри nanoDot™ (розмірами 10 ×10 мм) компанії Landauer Inc. на основі  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  (рис. 1.2).



Рис. 1.2 ОСЛ дозиметр Landauer nanoDot™ і вигляд його розміщення на тілі людини [2].

Перевагами методу ОСЛД перед більш традиційним методом ТЛ дозиметрії є відсутність необхідності нагрівати детектор, нерідко у спеціальній захисній атмосфері, що дозволяє зробити визначення поглиненої дози швидше, а відповідні пристрої для зчитування компактними, портативним та автономними. При оптичному стимулювання дозиметричний сигнал не зчитується один разі необоротно і повністю, а дозволяє багатократне зчитування, зберігання/документування після зчитування і навіть повторне використання без стирання залишкового сигналу. Ці та інші переваги ОСЛД призводять до поступового витіснення традиційної технології ТЛД на сучасною ОСЛ. Особливо виразно це проявляється у клінічній дозиметрії де радіаційні технології використовуються для діагностики, променевої та ізотопної терапії, а також для малоінвазивної хірургії. Технологія ОСЛ уможливило створення спеціальних дозиметричних систем для екстреної аварійної дозиметрії, де вона практично є безальтернативною.

## РОЗДІЛ 2. ВІДОМОСТІ ПРО КРИСТАЛИ YAP:Mn ТА ЙОГО ДОЗИМЕТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

Спочатку кристали ітрій-алюмінієвого перовськіту (YAP – YAlO<sub>3</sub>), активованій марганцем (YAP:Mn) вивчалися як матеріал для ТЛ дозиметрії. Про його придатність для цього було заявлено ще у 2005 році [3]. Водночас був виявлений сильний вплив оптичного випромінювання на сигнал накопичений кристалами. Тому вже у 2007 році була опубліковане перше дослідження ОСЛ в YAP:Mn [4]. Там же було зроблено перші висновки щодо необхідної дожини хвилі стимулюючого світла, 450-500 нм. Робота в напрямку ОСЛ дозиметрії розпочалась 2015, після розгорнених висновків Я. Жидачевського щодо YAP:Mn [5]. У цій же роботі були встановлені основні властивості матеріалу в дозиметрії, такі як: ефективний атомний номер, лінійність дозової залежності, термічний фединг, чутливість до ІВ.

YAP:Mn володіє дуже високим ефективним атомним номером ( $Z_{\text{eff}} = 31.4$  [5]), що значно відрізняється від тканин людини, де  $Z_{\text{eff}} = 7.42$ . Хоча така велика різниця може здатись недоліком, проте в цьому можуть бути й переваги [5]. YAP:Mn володіє широким інтервалом лінійності дозової залежності, до 2 кГр для  $\gamma$ -випромінювання. Термічний фединг, який характеризує втрату сигналу з часом за нормальних умов, в YAP:Mn не перевищує 20%/рік. Повідомлялося про встановлення його порогу чутливості у 3 мкГр, що є доволі хорошим показником у порівнянні з відомими дозиметричними матеріалами.

Попередні дослідження YAP:Mn як матеріалу ОСЛ виявили, що після імпульсного стимулювання синім світлом з довжиною хвилі 470 нм ОСЛ сигнал відгуку представляв собою загасання зеленого свічення, яке хоч і спадало доволі швидко у першу секунду після закінчення імпульсу стимулювання, все ж не згасало повністю навіть протягом кількох хвилин [6]. Очікувалося, що світлосума, яка випромінюється при звільненні носіїв заряду з дозиметричних пасток, є пропорційною до поглиненої дози, тому, природно,



що її намагалися оцінити як інтегральний відгук на імпульс стимулювання. Незгасання відгуку на протязі довшого часу спонукало оцінювати інтегральний відгук не сумуванням відліків виміряного сигналу, а шляхом інтегрування функції загасання від початкового моменту до нескінченності. Очікувалося, що функція загасання буде знайдена з апроксимації експериментально виміряного відгуку, однак з пошуком апроксимуючої функції виникли проблеми.

Люмінесцентний відгук на протязі секунд чи кількох хвилин апроксимувався достатньо добре сумою трьох експонент, однак при вимірюванні дозової залежності було встановлено, що амплітуди цих експонент не є пропорційними дозі опромінення. Більш тривале вимірювання відгуку ОСЛ на протязі від 20 до 200 хвилин [7] показало, що апроксимувати експериментальну кінетику загасання неможливо навіть сумою 4-5-ти експонент, як і іншими типовими моделями кінетики люмінесценції. Адекватна апроксимація стала можливою лише за допомогою т.з. узагальненої гіперболи

$$I(t) = I(0)[1 + wt]^{-\alpha}, \quad (2.1)$$

де  $w$  і  $\alpha$  – параметри апроксимації, а  $I(0)$  – інтенсивність люмінесценції у початковий момент часу (після припинення стимуляції).

Вперше, на відповідність кінетики згасання фосфорів функції виду (8) вказав Едмон Беккерель в середині 19-го століття, зазначаючи, що степінь у знаменнику гіперболи для різних кристалофосфорів може приймати значення від 1 до 2. Відтоді кінетику фосфоресценції виду (2.1) з нецілим степенем  $1 < \alpha < 2$  називають емпіричним законом загасання Беккереля [##Еліт].

Подальші дослідження виявили ще одну особливість виміряного загасання, а саме те, що значення  $\alpha$ , знайдене з апроксимації експериментальних даних виразом (2.1) рівне  $\approx 0,97$ , тобто є меншим за 1. У цьому випадку функція (2.1) стає неінтегрованою, що формально означає нескінченність енергії люмінесценції, що висвічується з кристалофосфору, що звичайно, не можливо. Це в свою чергу означає, що повільне згасання з  $\alpha \approx$

0,97, повинно збільшити швидкість наприкінці процесу [9], однак у виконаних досі експериментах цього виявлено не було.

Вимірювання загасання ОСЛ після кожного з серії імпульсів стимулювання показало, що рівень свічення на початку процесу (в межах 1 с) монотонно знижується, тоді як тривале загасання (поза 400 с) спочатку спадає, потім зниження рівня уповільнюється, а далі навіть зростає. Імовірною причиною цього може бути післясвічення, індуковане світлом стимулювання. У цьому разі, увесь вимірюваний люмінесцентний відгук є складним, тобто складається з випромінювальної релаксації носіїв, звільнених з дозиметричних пасток під час стимулювання, та післясвіченням, яке виникає через те, що звільнені носії не лише рекомбінують на центрах свічення ( $Mn^{2+}$ ), але й пере захоплюються мілкими пастками (рівнями прилипання), температура активації яких нижча чи близька до кімнатної і які, внаслідок цього, є нестабільними і спонтанно звільнюються у звичайних умовах, що призводить до повільного загасання післясвічення.

Отже, попередні дослідження ОСЛ показують, що після стимуляції світлом відбувається накладання власне явища ОСЛ внаслідок часткового звільнення дозиметричних пасток та післясвічення, спричиненого пере захопленням вільних носіїв рівнями прилипання, що поряд з фотолюмінесценцією є паразитним явищем при вимірюванні ОСЛ. Тоді, для пошуку шляхів розділення цих процесів слід дослідити особливості післясвічення кристалу  $YAP:Mn$  як після дії іонізівного випромінювання, так і внаслідок дії світла стимуляції в умовах, коли дозиметричні пастки є порожніми, частково заповнені і заповнені повністю.

Коли коректне врахування наявності післясвічення буде зроблене, тоді повстане питання регенерації опромінених дозиметричних детекторів для повторного використання. Найпростішим способом стирання дозиметричного сигналу є звільнення носіїв з метастабільних дозиметричних пасток шляхом термічної активації. Оскільки найбільш високотемпературні піки термо-стимульованої люмінесценції спостерігаються за температур 210 та 350 °C

[10], то навіть короткочасного відпалу у повітрі за температури 400 °С достатньо для повного спустошення усіх глибоких пасток та відновлення здатності детектора знову накопичувати носії заряду, які виникають при іонізаційному опроміненні. Однак, практичне використання дозиметричних детекторів накладає свої вимоги. Необхідність захисту від дії будь-якого світла видимого діапазону вимагає, щоби дозиметричні детектори знаходилися у світлонепроникному корпусі дозиметра як при їх дії іонізаційного випромінювання, так і до початку та під час вимірювання накопиченої дози у зчитувачі. Окрім того, корпус дозиметра не може бути виготовлений з матеріалу з великим атомним номером, який сам буде поглинати та розсіювати випромінювання на його шляху до детектора. Тому, корпус дозиметра виготовляють з ABS-пластику (акрилонітрилбутадієнстиролу), який однак не може витримати температури  $> 200$  °С. З цього слідує, що регенерацію дозиметричних детекторів і стирання залишкового дозиметричного сигналу ОСЛ після вимірювання поглиненої дози слід робити світлом з доступом променя до детектора у світлонепроникній камері у такий самий спосіб, як і здійснюється стимулювання ОСЛ. Однак, особливості такого способу стирання досі не досліджувалися, і невідомо, як параметри процесу оптичного стирання, зокрема необхідний час стирання, пов'язані з дозою попереднього опромінення.

Отже, метою цієї роботи було дослідити особливості післясвічення кристалів YAP:Mn, зокрема його залежність від дози опромінення, та способу оптичного стирання дозиметричного сигналу.

Для досягнення мети виконувалися такі завдання:

- Розробити пристосування для точного позиціонування зразків під час опромінення у пучку X-променів для точного відтворення умов опромінення;
- Розробити електромеханічний затвор для управління експозицією зразків під пучком X-променів.

- Розробити таймер для точного задання часу експозиції опромінення X-променями через управління затвором та часу оптичного стирання через вмикання/вимикання джерела оптичного випромінювання.
- Провести вимірювання кінетики загасання післясвічення зразків, опромінених X-променями в інтервалі доз в 1-2 порядки значення та встановити закономірності його поведінки
- Провести вимірювання сигналу ОСЛ імпульсно-модульованим методом стимулювання після опромінення та після сеансів стирання неперервним потужним видимим світлом різної довжини хвилі.
- Встановити закономірності залежності залишкового дозиметричного сигналу від часу оптичного стирання світлом різних довжин хвиль та дослідити можливість оцінювання часу стирання до заданого рівня за значенням виміряного сигналу ОСЛ.

## РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ТА СТВОРЕННЯ ДОПОМІЖНОГО ОБЛАДНАННЯ

### 3.1 Макет для вимірювання ОСЛ та особливості методу

Основні експериментальні дослідження люмінесцентних відгуків кристалів на основі YAP:Mn виконувалися за допомогою експериментального макету зчитувача ОСЛ відгуку, зовнішній вигляд якого зображений на рис. 3.1.

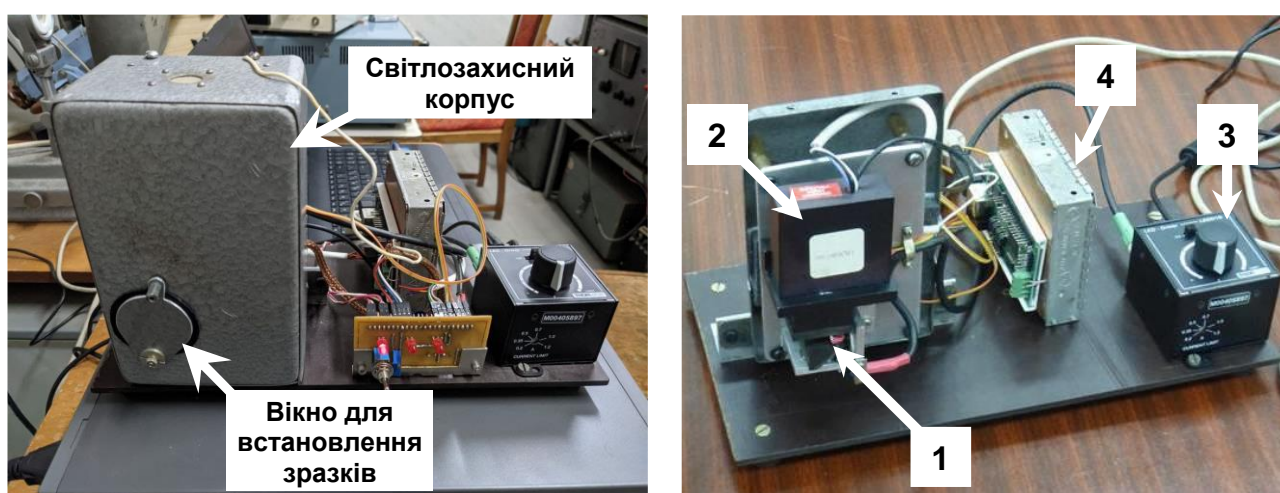


Рис. 3.1 Зовнішній вигляд (зліва) і вид на внутрішню частину (справа) експериментального макета зчитувача. На фото справа позначені: 1 – предметний столик для зразків, 2 – фотоприймач, 3 – блок управління світлодіода T-Cube LEDD1B, 4 –електронний модуль ліку фотонів з мікроконтролером.

Він був розроблений для дослідження ОСЛ відгуку дозиметричного кристалофосфору на основі YAP:Mn, але можна використовувати й для інших експериментів. Його оптична схема показана на рис. 3.2. Головними елементами є:

- джерело стимулюючого світла з довжиною хвилі 470 нм – потужний світлодіод M470D2 (Thorlabs Inc.), змонтований на металевій платі, з максимальною оптичною потужністю випромінювання 650 мВт (рис. 3.2;
- електромеханічний затвор;
- фотоприймач, яким виступає компактний модуль фотоелектричного помножувача (ФЕП) H9305-04 (Hamamatsu Photonics Inc.) (рис. 3.3);
- модуль ліку фотонів;
- мікроконтролер для управління, збирання даних та взаємодії з зовнішнім комп'ютером;
- блок управління світлодіодом (формував імпульсів) з блоком живлення;
- блок живлення системи;
- комп'ютер для управління вимірюванням, збирання та оброблення даних.

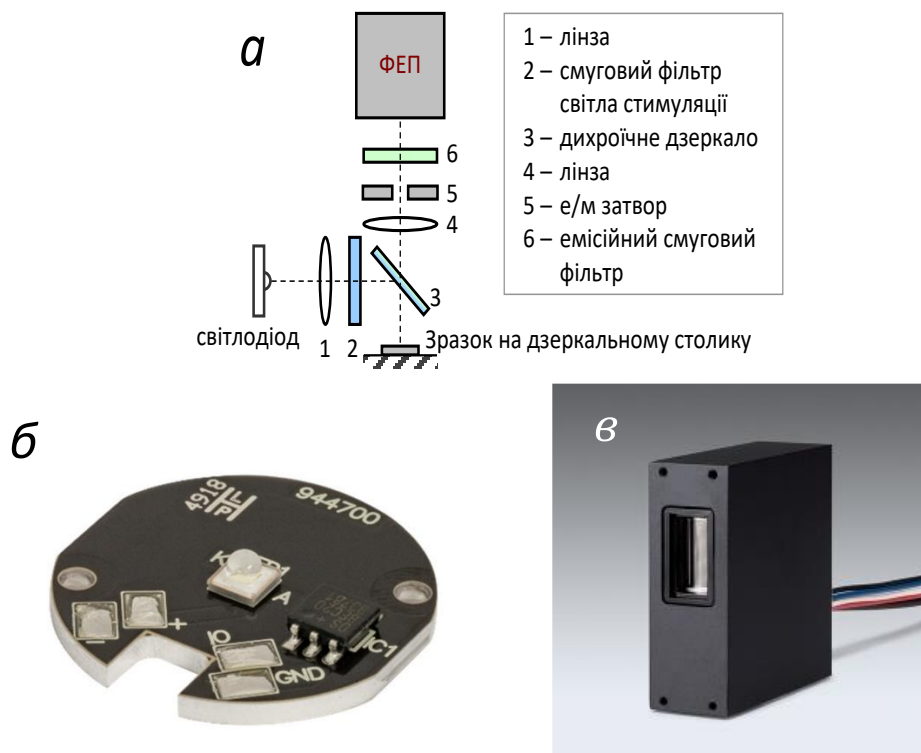


Рис. 3.2 Оптична схема зчитувача ОСЛ (а) і зовнішній вигляд світлодіода M470D2 (б) та ФЕП Hamamatsu H9305-04 (в).

Особливістю використаних світлодіодів Thorlabs на металевій платі, є їхня універсальна конструкція, яка дозволяє замінювати світлодіоди з різною довжиною хвилі випромінювання без зміни конструкції усієї системи.

Принцип вимірювання люмінесцентного відгуку полягає у реєстрації світлового потоку випромінювання, спричиненого у залежності від виду люмінесценції різним впливом на об'єкт дослідження. Для фотолюмінесценції (ФЛ) – це світлове збудження центрів свічення. Для оптично-стимульованої люмінесценції (ОСЛ) – це стимуляція світлом, звільнення носіїв заряду з метастабільних при кімнатній температурі пасток, які рекомбінують на центрах рекомбінації. Для стимулювання використана довжина хвилі 470 нм, яка не потрапляє у смуги збудження фотолюмінесценції, однак фотолюмінесценція все одно спостерігається при вимірюванні ОСЛ, як паразитна люмінесценція у тій самій смузі. З цієї причини вимірювання відгуку ОСЛ повинно бути розділене у часі, тобто реєстрація ОСЛ відбувається після того, коли згасне ФЛ-відгук. Для часороздільної реєстрації використовується електромеханічний оптичний затвор, який закриває вікно ФЕП на час імпульсу стимулювання та інтервал часу  $\sim 20$  мс після завершення стимулювання, якого достатньо для загасання ФЛ з часом життя 3,5 мс [11]. Окрім ФЛ кристалу паразитна люмінесценція спостерігається і від самого макету, причина якої полягає у використанні пластикових деталей, лаків та фарб і розсіяним світлом стимулювання. Ця компонента, що має сталу поведінку і параметри, реєструвалася окремо без зразка і віднімалася від вимірюваного сигналу при експериментах зі зразком.

Для реєстрації слабкого світлового потоку люмінесцентного відгуку досліджуваного зразка ФЕП працює у режимі ліку фотонів [12], в якому мірою інтенсивності світлового потоку є кількість однофотонних імпульсів за інтервал накопичення. В наших експериментах інтервал накопичення складав від 2 мс для швидкозмінної інтенсивної фосфоресценції до 3 с для повільного загасання, що мало відрізнялося від шумового сигналу, який називають темновим ліком. Для врахування наявності темнового ліку застосовувалася процедура його квазісинхронного віднімання від вимірюваного сигналу за процедурою, описаною в [13]. Для інтенсивних потоків, для яких однофотонні імпульси починають перекриватися, що призводить до нелінійності ліку фотонів від вимірюваної

величини, застосовувалася процедура корегування нелінійності, описана в [7]. Макет зчитувача може здійснювати реєстрацію люмінесцентного загасання протягом тривалого часу, який у наших експериментах тривав до  $10^4$  с, а для реєстрації ще більш тривалих процесів загасання, післясвічення вимірювання продовжувалися наступного дня без вилучення зразка так, що вимірні дані компонувалися в одну залежність на єдиній часовій шкалі.

Вимірювання проводилися у темній кімнаті, без впливу стороннього природного чи штучного освітлення. Для виконання операцій зі встановлення зразка використовувалося освітлення малопотужного червоного індикаторного світлодіода (рис. 3.3).



Рис. 3.3 Робочі умови опромінення. Фото зроблене за великої витримки.

### 3.2 Зразки для дослідження

Досліджувалися зразки з монокристалу ітрій-алюмінієвого перовськіту ( $YAP - YAlO_3$ ), активованого Марганцем ( $YAP:Mn$ ), вирощеного методом Чохральського за технологією, описаною в [14, 15]. Зразки вирізалися алмазною пилою і мали розмір  $3 \times 3 \times 1$  мм<sup>3</sup>. Опромінення та люмінесцентне випромінювання вимірювали з боку однієї з великих граней. Інша для їх розрізнення, а також для однакового орієнтування і позиціонування зразків при опроміненні та вимірюваннях, маркувалася за допомогою олівця з графітовим стрижнем, як показано на рис. 3.4.





Рис. 3.4 Досліджувані зразки ( $3 \times 3 \times 1$  мм<sup>3</sup>) з кристалу YAP:Mn.

Усі зразки перед опроміненням попередньо оброблялися відпалом на повітрі за температури 400 °С протягом 10 хв, чого достатньо для термічного активування звільнення носіїв з усіх пасток кристалу. Таке термооброблення проводилося у муфельній печі КО-4 (рис. 3.5), яка обладнана сімома силітовими стержнями нагрівання. Нагрівання до температури відпалу відбувалося при повній потужності електронагрівача, а остигання зразка відбувалося у печі без примусового охолодження при відкритих дверцятах.



Рис. 3.5 Муфельна піч КО-4 для відпалювання зразків на повітрі.

### 3.3 Опромінення зразків X-променями

Для опромінення кристалів використовували рентгенівський апарат УРС-0.02, (рис 3.6), який розміщений разом з макетом зчитувача у затемненій кімнаті для уникнення стороннього засвічування під час експериментів. Випромінювання мало такі характеристики: анодна напруга рентгенівської

трубки складала 45 кВ, анодний струм 0.3 мА. Експонування досліджуваних зразків здійснювалося у діапазоні від 2 до 1000 с за допомогою спеціально розробленого електромеханічного затвору, а для точного вимірювання часу експозиції та управління затвором був використаний таймер, аналогічний до описаного нижче у підрозділі 3.5. Для точного і однакового позиціонування зразка при експонуванні відносно рентгенівського пучка було виготовлене спеціальне пристосування, зображене на рис. 3.6.

Поглинена доза при опроміненні оцінювалася за часом експозиції на основі попередньо визначеного коефіцієнту перерахунку, який визначався за порівнянням термолюмінесцентної світлосуми опромінення X-променями у згаданих умовах з такою ж величиною такого ж зразка, опроміненого каліброваним джерелом  $\gamma$ -квантів ізотопу  $^{60}\text{Co}$  ( $E = 1,25 \text{ MeV}$ ). Так було встановлено, що опромінення протягом 10 с, відповідає поглиненій дозі 0,3 Гр.



Рис. 3.6 Зовнішній вигляд рентгенівської установки УРС-0.02 (зліва) та її блоку управління (справа).

При вимірюванні післясвічення опромінених X-променями зразків, час після завершення опромінення до початку вимірювання кривої загасання (час на перевстановлення зразка) складав типово 70-100 с і вимірювався секундоміром для врахування при обробленні вимірних даних.

### 3.4 Розроблення макету оптичного стирача ОСЛ відгуку

Виходячи з вимог до оптичного стирання залишкового дозиметричного сигналу [16] та наявних технічних можливостей, макет оптичного стирача був розроблений на основі найпростішої конструкції з металевої коробки, з лудженням внутрішньої поверхні, яка сприяла багатократному відбиванню світла від джерела. Джерелами світла виступали потужні світлодіоди M470D2 синього (470 нм), M530D3 – зеленого (530 нм) і M660D2 – червоного (660 нм) випромінювання від Thorlabs Inc. Світлодіоди з номінальною потужністю випромінювання 0,5 Вт при струмі 1,2 А монтувалися у тепловому контакті радіатор для тепловідведення світлодіоду, який у неперервному режимі може надійно розсіювати кілька Вт теплової потужності. А сам радіатор монтувався на знімній кришці так, щоби світло потрапляло лише всередину корпусу. Зовнішній вигляд та розміщення світлодіоду на знімній кришці макету показані на рис. 3.7. Завдяки тому, що використані світлодіоди мають ідентичну конструкцію та кріплення і є взаємозамінними, для дослідження стирання світлом різної довжини хвилі можна було використати один макет, однак для скорочення часу на виконання експериментів було виготовлено два ідентичних макети стирачів, які використовувалися по чергово.



Рис. 3.7 Зовнішній вигляд макетів оптичного стирача (зліва) та розміщення світлодіода на внутрішню сторону кришки (справа).

### 3.5 Розроблення макету таймера експозиції

Таймер експозиції був розроблений для точного контролю часових умов опромінення через управління електромеханічним затвором, що перекривав

рентгенівський пучок, і для вмикання/вимикання джерела світла в експериментах зі стирання залишкового сигналу. Для побудови таймера використані плати Arduino Nano v3.0 на базі мікроконтролера Atmega 168P (рис. 3.8). Таймер реалізований на основі функції затримки delay у програмному середовищі Arduino IDE. Час цієї затримки відповідає часу відкривання затвора чи увімкнення світлодіода. Він задається груповим перемикачем Dip-Switch на десять позицій. Перемикачі пронумеровані, від 1 до 10. Перемикачі 1-9 задають певні значення часу затримки у секундах. Ці значення можна сумувати комбінуючи ввімкнення перемикачів. Перемикач під номером 10 відповідає за множення, заданого попередніми перемикачами значення, на 10. Відлік затримки вмикається, якщо натиснути окрему від Arduino кнопку. Із увімкненим відліком затримки подається напруга 5 В між затвором і витком N-канального транзистора, що переводить його у відкритий стан. В свою чергу, транзистор є ключем в колі із світлодіодом або затвором.

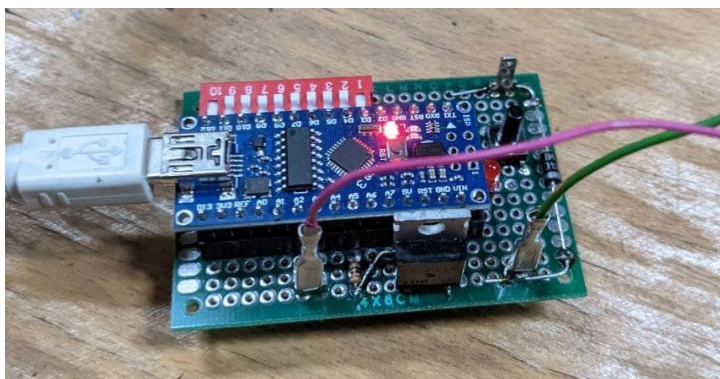


Рис. 3.8 Зовнішній вигляд таймера експозиції

### 3.6 Методика вимірювань ОСЛ та післясвічення

Вимірювання ОСЛ та післясвічення відбувається на одному макеті зчитування, який описаний у розділі 3.1. Суть вимірювання полягає у реєстрації ФЕП світлового потоку від кристала, встановленого у камеру зчитувача. Вимірювання відбувається шляхом відкривання/закривання електромеханічного затвора, із заданим інтервалом. Цей інтервал задається декількома складовими, які проілюстровані на рис. 3.9 [6].



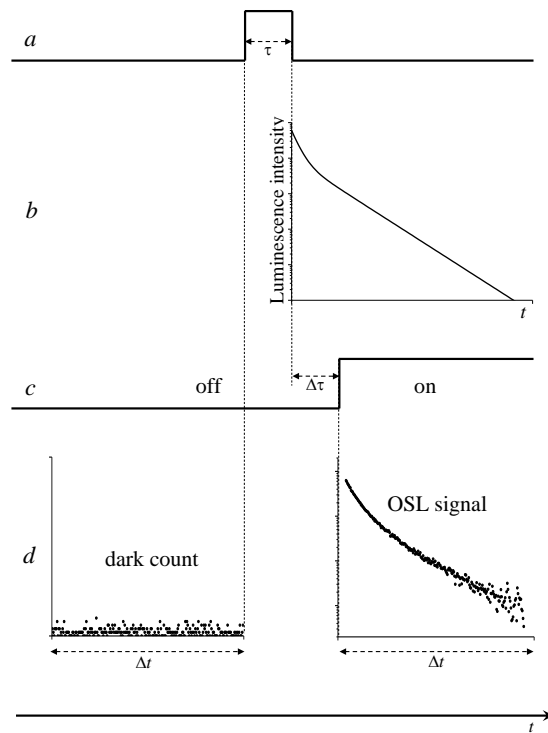


Рис. 3.9 Часова діаграма циклу запису відгуку ОСЛ: імпульс збудження (a), інтенсивність люмінесценції після збудження (b), стан затвора (c), записаний сигнал на ФЕП (d) [6].

Час запису ( $\Delta t$ ) однаковий для темного ліку (dark count) і сигналу ОСЛ (OSL signal). Темновий лік вимірюється перед кожним вимірюванням ОСЛ для відповідного квазісинхронного віднімання. Ці дві складові розділяє у часі час імпульсу збудження або ж час увімкнення світлодіода ( $\tau$ ) і час який відводиться на загасання ФЛ ( $\Delta\tau$ ). Всі три складові часу циклу запису можна регулювати у програмі на комп'ютері. Для вимірювання післясвічення не використовується імпульс збудження і відповідно відсутня складова ФЛ. Попри це для спрощення вимірювань і простоти порівняння у часі двох складових, ОСЛ і післясвічення, використовуються ці ж інтервали.

Для виконання робіт, наведених у розділі 4, використовувався час запису 300 мс для ОСЛ і 3000 мс для післясвічення. Тривалість імпульсів збудження складала 10 мс і окремо 4 мс для кристала опроміненого протягом 1000 с.

## РОЗДІЛ 4. ЛЮМІНЕСЦЕНТНИЙ ВІДГУК YAP:Mn ВНАСЛІДОК ОПРОМІНЕННЯ X-ПРОМЕНЯМИ ТА ВИДИМИМ СВІТЛОМ

У цьому розділі описані результати експериментального дослідження люмінесцентного відгуку кристалу YAP:Mn, спричиненого іонізуючим випромінюванням X-променів, оптично-стимульованої люмінесценції (ОСЛ) опроміненого кристалу, та експерименти зі стирання залишкового сигналу ОСЛ оптичним випромінюванням різних довжин хвилі видимого діапазону спектру.

### 4.1. Післясвічення, викликане опроміненням X-променями

Після опромінення YAP:Mn X-променями так, як описано у 3-му розділі спостерігалось помітне післясвічення. Воно вимірювалось через деякий час  $\Delta t$  після закінчення експонування, який був необхідний для переміщення зразка з тримача зразків під пучком рентгенівської трубки на предметний столик зчитувача ОСЛ. При цьому жодного іншої дії до опроміненого зразка не застосовували.

Тривалість запису кінетики загасання післясвічення становила приблизно 3 години ( $\sim 10^4$  с), а типовий час затримки  $\Delta t$  складав 70...100 с. Доза опромінення контролювалася за часом експонування, який складав від 2 до 1000 с. Апроксимація проводилася модифікованим виразом емпіричної функції загасання Бекереля (2.1), що враховує затримку  $\Delta t$  від закінчення опромінення до початку вимірювань:

$$I(t) = I(0)[1 + w(t + \Delta t)]^{-\alpha}. \quad (4.1)$$

Слід зазначити, що затримка  $\Delta t$  у (4.1) може бути знайдена з апроксимації, як і інші параметри залежності. В усіх експериментах значення затримки, знайдене з апроксимації як вільний параметр, з точністю краще за 1 с співпадали з вимірним часом затримки, який реєструвався секундоміром. Після цього цей параметр фіксувався і апроксимація проводилася підгонкою інших параметрів залежності (4.1).

Результати вимірювання показані на рис. 4.1 для одного з досліджених зразків (зразок S3) разом з апроксимуючими кривими та результатами визначення параметрів апроксимації, поданих у таблицях. Як видно з рисунку, якість апроксимації дуже хороша, а її кількісна характеристика – квадрат приведенного коефіцієнту кореляції (Adj.  $R^2$ ) в усіх випадках не гірше за 0,999, а для часу опромінення від 20 с – не гірше за 0,9999.

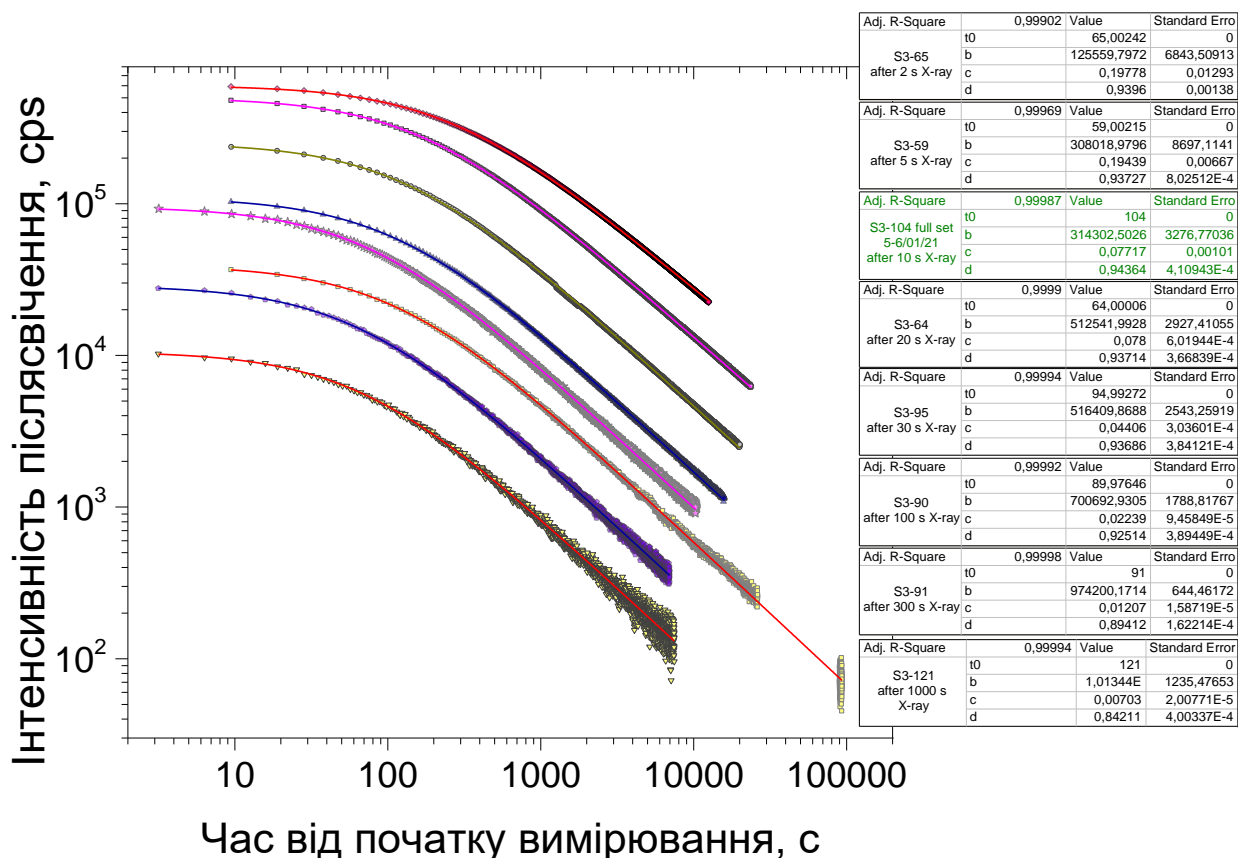


Рис. 4.1 Криві загасання післясвічення кристалу YAP:Mn, опроміненого X-променями з експозицією 2 с (найнижча залежність), 5 с, 10 с, 20 с, 30 с, 100 с, 300 с та 1000 с (найвища залежність). Точками подані виміряні значення ліку фотонних імпульсів за секунду (cps – counts per second). Суцільні лінії представляють апроксимацію виразом (4.1), а параметри апроксимації у таблицях відповідають позначенням:  $t_0 - \Delta t$ ;  $b - I(0)$ ;  $c - w$ ;  $d - \alpha$ .

Для точнішого встановлення характеру кінетики загасання для одного з експериментів (експозицією 10 с) реєстрація загасання була продовжена

наступного дня через 25 годин після початку вимірювань без виймання зразка і тривала 1 годину, після чого додаткові виміряні дані були долучені до вимірної напередодні залежності у єдиній часовій шкалі. Ця крива загасання представлена третьою знизу на рис. 4.1. Вона демонструє, що:

- 1) Навіть після 10 с опромінення X-променями післясвічення триває понад добу ( $\sim 10^5$  с) не досягаючи рівня темного ліку.
- 2) Характер кінетики не змінюються за час понад одну добу ( $\sim 10^5$  с) і в усьому інтервалі часу загасання кінетична крива добре описується бекерелевою функцією практично з такими ж параметрами, як і в інтервалі часу до  $10^4$  с.
- 3) Кристали YAP:Mn можуть розглядатися як перспективний фосфор з тривалим післясвіченням зеленого кольору і знайти відповідне застосування для таких матеріалів, що стало трендом для люмінесцентних досліджень діелектричних матеріалів в останні десятиліття [17-19].

Окрім цього, для того ж зразка після 10 с опромінення, була виміряний рівень післясвічення через шість діб після експонування. Ці вимірювання не виявили відмінності від рівня темного шуму і тому не увійшли в дані, показані на рис. 4.1.

На рис. 4.2 подані ті самі експериментальні дані, що й на рис. 4.1, але в абсолютній шкалі часу після припинення опромінення. Експериментальна залежність для експозиції 10 с наведена разом з екстрапольованою до початкового моменту апроксимуючою кривою.

З даних апроксимації, поданих у таблицях на рис. 4.1, можна аналізувати поведінку параметрів процесу загасання зі збільшенням часу (дозы) опромінення. На рис. 4.3 показана зокрема залежність початкового рівня післясвічення від тривалості опромінення, яка демонструє насичення збудження післясвічення і наближення до стаціонарного стану, коли зростання рівня післясвічення за рахунок генерування носіїв заряду внаслідок іонізації, урівноважується зворотнім процесом рекомбінаційної фосфоресценції.



З іншого боку, решта параметрів апроксимації (коефіцієнт при часовій змінній, що має зміст величини, оберненої до сталої часу релаксаційного процесу та степінь гіперболи) не залишаються сталими в межах похибки визначення параметрів апроксимації, як того можна було б очікувати з інтерпретації кінетики Бекереля [9, 20] у найпростішій моделі фосфору з одним рівнем прилипання (мілкою пасткою) та одним центром рекомбінації. Для такої модельної системи Адерович показав [9, 20], що степінь гіперболи в (4.1) може бути меншою за 1, якщо ймовірність перезахоплення звільнених носіїв мілкими пастками суттєво перевищує ймовірність рекомбінації. Однак, отримані нами результати, хоч і демонструють повільну кінетику загасання з  $\alpha < 1$ , однак у випадку YAP:Mn, інтервал існування такої кінетики на 2-3 порядки ширший, ніж передбачає модель Адеровича. Ці розбіжності можуть бути викликані тим, що післясвічення в YAP:Mn підживлюється не лише носіями з найбільш мілкового рівня, але й з інших – одного чи більше мілких рівнів. Про наявність таких свідчать опубліковані дані термолюмінесценції кристалів YAP:Mn [10].

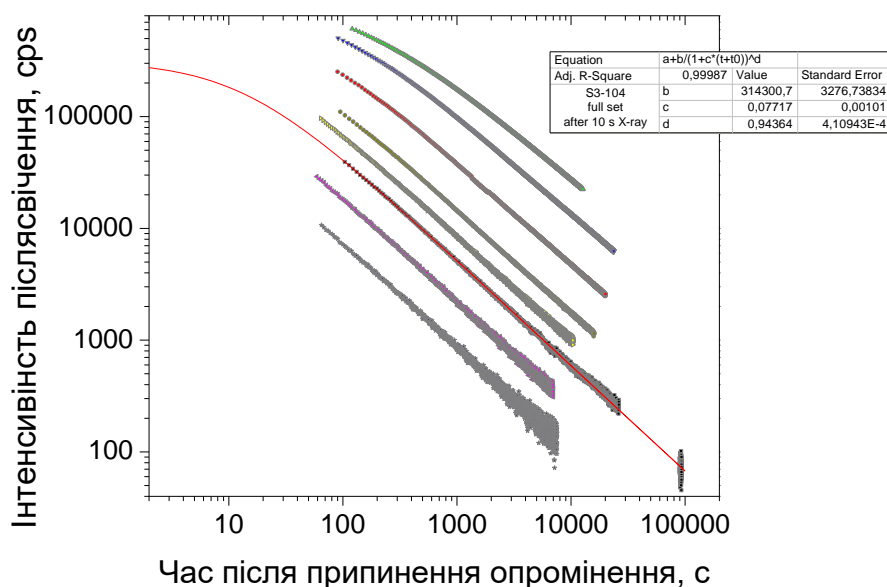


Рис. 4.2 Післясвічення кристалу YAP:Mn як функція часу після припинення опромінення X-променями з експозицією від 2 до 1000 с. Решта пояснень до рисунку аналогічна наведеним у підписі до рис. 4.1.

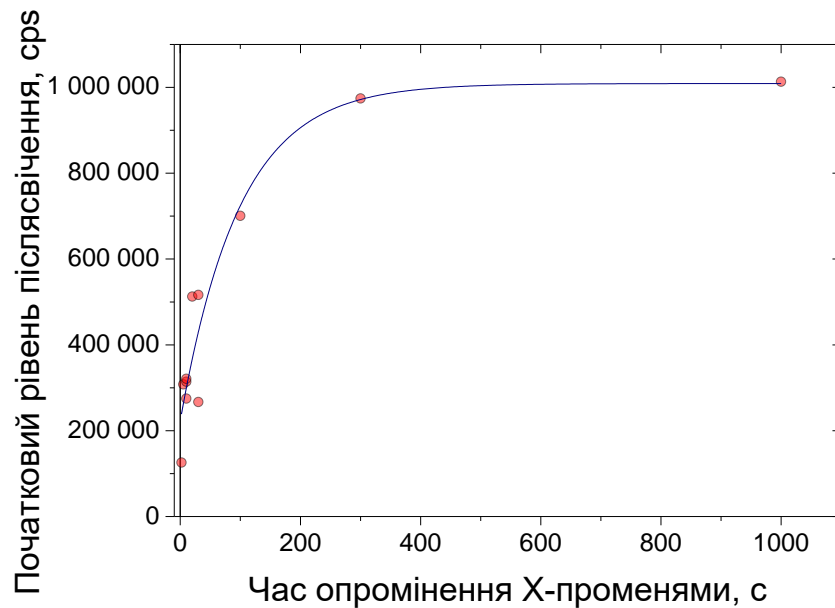


Рис. 4.3. Дозова залежність початкового ( $t = 0$ ) значення рівня післясвічення та її апроксимація функцією виду  $y = A(1 - \exp(-t/\tau))$ .

Післясвічення спостерігалось також і після опромінення стимулюючим оптичним опроміненням, про що йтиметься нижче.

#### 4.2. Оптично-стимульована люмінесценція

До остаточного встановлення способу відділення сигналу ОСЛ від післясвічення ми для дослідження її поведінки, зокрема при дослідженні ступеня стирання реалізували таку схему вимірювання:

Спочатку регенований термічним відпалом зразок кристалу YAP:Mn опромінювався та витримувався добу для згасання післясвічення до незначного рівня. Вимірювання ОСЛ здійснювали у режимі імпульсно-модульованої стимуляції синім світлом (470 нм) імпульсами тривалістю 10 мс, а реєстрація відбувалася з часовим розділенням у проміжках між імпульсами стимулювання в інтервалі часу від 20 с після припинення імпульсу до наступного. Період повторення імпульсів стимулювання складав 345 мс. Оскільки стимулювання ОСЛ звільняє носії з метастабільних дозиметричних пасток, то чим більша загальна тривалість стимулювання, тим меншою стає інтенсивність ОСЛ.

Однак, у межах 100 коротких імпульсів стимулювання таке зменшення амплітуди ОСЛ вважалося незначним і сигнал ОСЛ, виміряний у проміжках сумувався для зниження розкиду миттєвих значень інтенсивності. Отримані таким способом усереднені за 100 імпульсами стимулювання відгуки ОСЛ подані на рис. 4.4 у серії експериментів зі стирання дозиметричного сигналу. Перша виміряна крива загасання ОСЛ є верхньою на рис. 4.4, а усі наступні є записами ОСЛ відгуку після сеансу стирання світлом з довжиною хвилі 660 нм у неперервному режимі з номінально максимальною для світлодіода потужністю. Кожний сеанс стирання тривав 10 с.

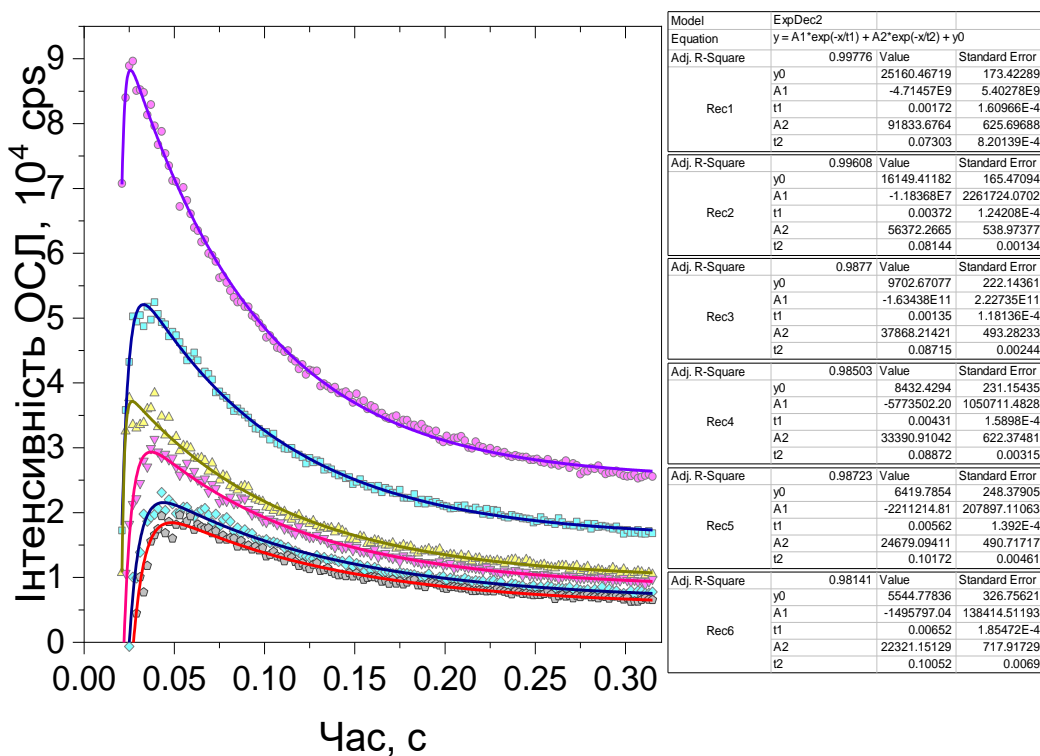


Рис. 4.4 Криві загасання ОСЛ за 300 мс після процедур стирання червоним (660 нм) світлом. Верхня крива – ОСЛ після опромінення Х-променями; криві за спаданням – ОСЛ від першого до п'ятого сеансу стирання тривалістю 10 с.

Отримані експериментальні залежності мають характер розгоряння та спадання інтенсивності люмінесценції після імпульсу оптичного стимулювання, тому їх апроксимували функцією, що є сумою двох експонент

(зростання та спадання). Разом із тим виміряна початкова висхідна ділянка ОСЛ може не відповідати дійсності з кількох причин:

- Вона містить лише кілька експериментальних точок на ділянці кінетичної кривої з високою швидкістю зміни сигналу.
- Ця частина кривої люмінесцентного відгуку отримується з віднімання паразитної апаратної люмінесценції від вимірних значень, тому похибка результату віднімання на крутій ділянці сигналу може бути набагато більшою за типову.

Якщо ж аналізувати спадну частину сигналу ОСЛ, то вона достатньо добре відповідає експоненційній релаксації з часовою константою 73...100 мс, що добре узгоджується з даними [11].

### **4.3. Особливості процесу оптичного стирання сигналу ОСЛ**

Щойно описаний спосіб вимірювання сигналу ОСЛ був застосований для моніторингу рівня залишкового сигналу у серії сеансів стирання. Ці дослідження виконували два завдання – встановити часову залежність залишкового рівня ОСЛ від часу стирання та перевірити ефективність стирання світлом різної довжини хвилі.

Стирання зразків, опромінених однаковою дозою, окремими сеансами по 10 с, трьома різними джерелами показало чітку залежність рівня стирання від довжини хвилі стимулюючого світла, рис. 4.5. Як і передбачалось, найбільший ефект стирання є від 470 нм джерела, який спадає зі зростанням довжини хвилі стимулюючого опромінення. Вже після третьої процедури стирання джерелом 470 нм нормоване значення ОСЛ становило 12% від початкового рівня сигналу.

Оскільки оптична потужність випромінювання була практично однаковою, то з проведених експериментів слідує, що швидкість стирання зменшується з ростом довжини хвилі стираючого світла,.

Для усіх використаних кольорів світла залежність залишкового сигналу від часу стирання дуже добре апроксимується експоненційною функцією

релаксації. Це відкриває шлях до визначення часу стирання за рівнем залишкового сигналу ОСЛ. Якщо функція зменшення рівня сигналу ОСЛ з часом стирання має вигляд

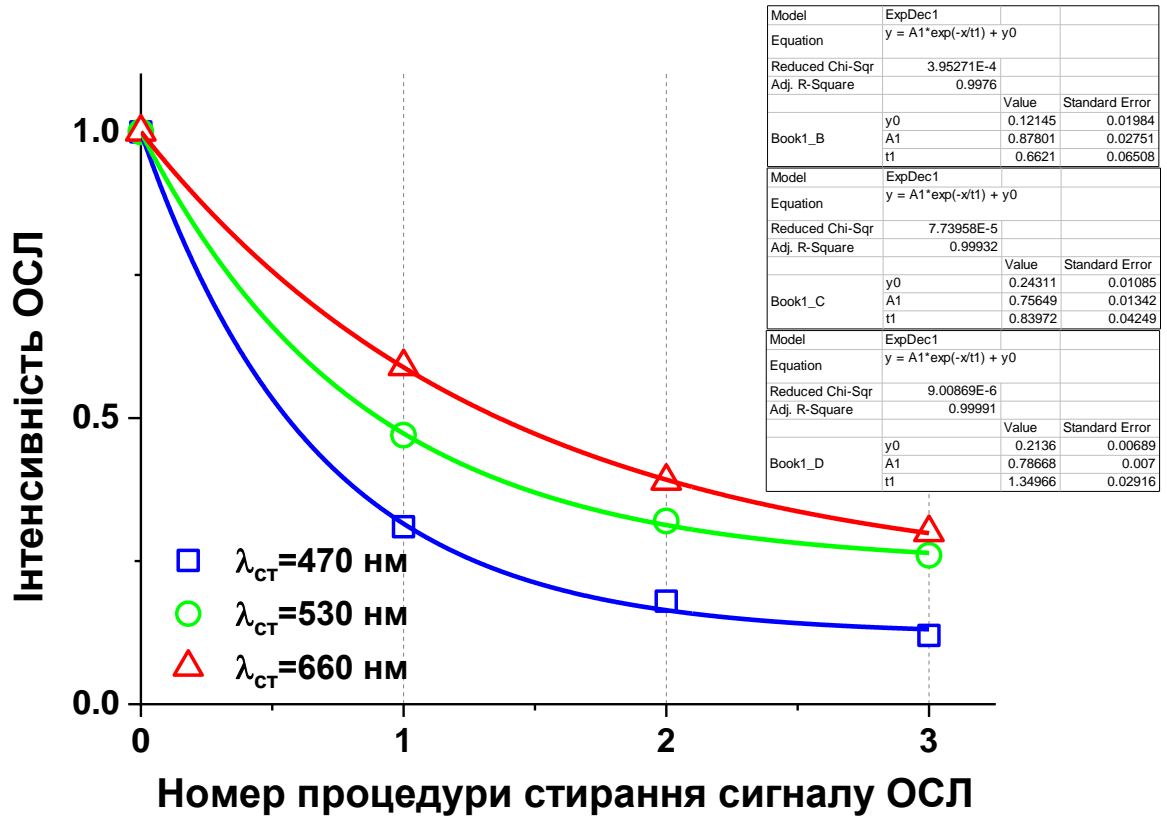


Рис. 4.5 Залежність рівня інтенсивності ОСЛ від номера процедури стирання.

$$I_{OSL}(t) = I_{OSL}(0)[1 - \exp(-t/\tau)],$$

де  $\tau$  – стала часу релаксаційної функції, а сигнал ОСЛ вважається повністю стертим, якщо його рівень складатиме  $I_Z$ , то час  $t_Z$ , необхідний для стирання, розраховується з вирішення рівняння:

$$I_Z = I_{OSL}(0)[1 - \exp(-t_Z/\tau)],$$

звідки

$$t_Z = -\tau \cdot \ln\left(1 - \frac{I_Z}{I_{OSL}(0)}\right).$$

Експерименти зі стирання доводять також можливість стимулювання ОСЛ світлом довжиною хвилі 530 і 660 нм, тобто світлом усього видимого діапазону спектру.

Ще одна особливість дії стираючого світла була виявлена при реєстрації післясвічення після сеансів стирання. Відповідні криві загасання показані на рис. 4.6. Як видно з рисунку початковий рівень післясвічення внаслідок першого сеансу стирання є вищий, ніж той, до якого опустилося післясвічення внаслідок витримки після опромінення. Це доводить, що світло видимого діапазону спектру також спричинює післясвічення, яке слід враховувати при вимірюванні ОСЛ та визначенні поглиненої дози іонізівного випромінювання за такими вимірюваннями.

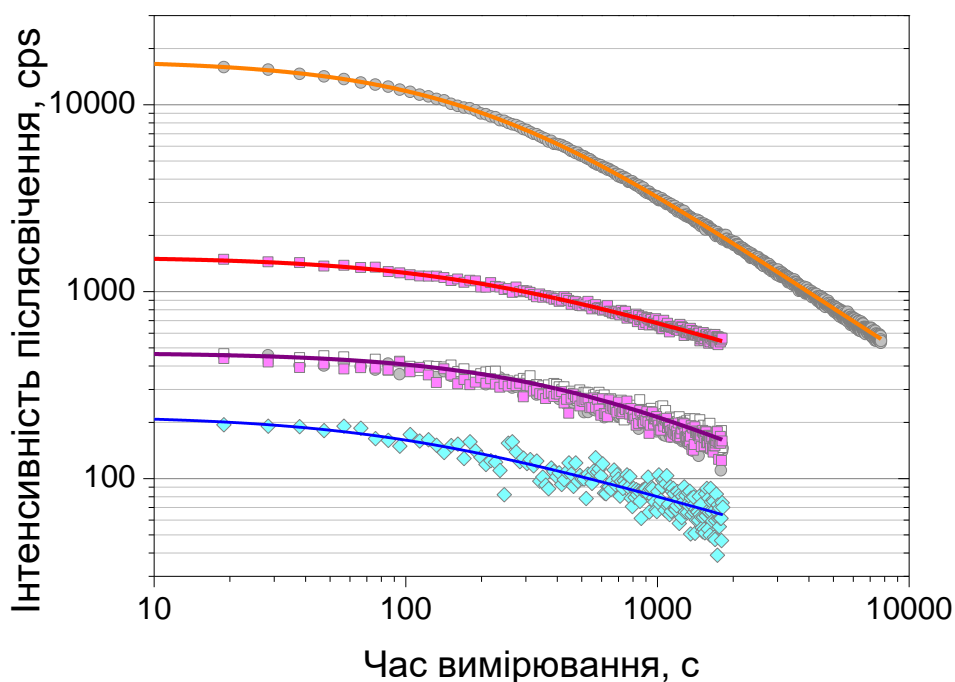


Рис. 4.6 Загасання післясвічення після опромінення X-променями (верхня крива) та після послідовних сеансів стирання червоним світлом (660 нм). Експериментальні значення позначені точками, а суцільні криві відображають апроксимації функцією загасання Бекереля.

## ВИСНОВКИ

Дане дослідження виконане в рамках участі у науково-дослідній роботі за грантом Національного фонду досліджень «Розроблення прототипу системи екстреної дозиметрії в умовах техногенних радіаційних аварій та терористичних атак» і містить результати вивчення люмінесцентного відгуку дозиметричних детекторів з кристалу  $\text{YAP:Mn}$  на дію іонізівного випромінювання та світла видимого діапазону спектру.

1. Для проведення експериментального дослідження розроблено, виготовлено та апробовано додаткове обладнання, що включає пристосування для точного позиціонування зразків, таймер контролю часу опромінення та часу стирання дозиметричного сигналу, а також макет пристрою для оптичного стирання залишкового дозиметричного сигналу.
2. Експериментальними дослідженнями підтверджено, що люмінесцентний відгук на оптичне стимулювання опроміненого кристалу  $\text{YAP:Mn}$  є поєднанням кількох релаксаційних процесів – оптично-стимульованої люмінесценції (ОСЛ), яка використовується для визначення поглиненої дози пасивним дозиметром на основі  $\text{YAP:Mn}$ , та тривалого післясвічення, яке перешкоджає вимірюванню ОСЛ. Встановлено, що в інтервалі часу до 350 мс сигнал ОСЛ має експоненційне згасання після стимулювання. Тривале загасання люмінесцентного відгуку, яке може тривати більше доби ( $10^5$  с), пов'язане з явищем післясвічення і виникає як при дії іонізівного випромінювання так і світла видимого діапазону. Кінетика післясвічення в межах інтервалу часу у 4-5 порядків з високою точністю описується емпіричним законом загасання Бекереля з степенем гіперболи, меншим за 1. Порівняння отриманих результатів з відомою інтерпретацією подібної кінетики післясвічення вказує на, те, що у релаксації електронних збуджень беруть участь кілька мілких пасток, а імовірність пере захоплення ними

носіїв заряду звільнених стимулюванням з дозиметричних пасток є вищою, ніж імовірність рекомбінації на іонізованих іонах активатора.

3. Дослідження оптичного стирання дозиметричного сигналу світлом різних довжин хвиль (470, 530 та 660 нм) показало, що світло кожного кольору може бути використане як для стимулювання ОСЛ відгуку, так і для його стирання. При цьому ефективність стирання зменшується з довжиною хвилі, хоча для усіх трьох довжин хвилі залежність рівня залишкового дозиметричного сигналу від часу стирання має характер експоненційної релаксації. Це дозволяє за вимірюванням рівня ОСЛ відгуку розрахувати час стирання, необхідний для зниження залишкового сигналу до заданого рівня.
4. Повільне згасання післясвічення кристалу YAP:Mn, вказує на перспективи його застосування як фосфору з тривалим свіченням, що знаходять застосування в галузі біомедичних технологій та люмінесцентних джерел світла для агровиробництва.
5. Результати цього дослідження опубліковані частково у матеріалах 78-ої студентської науково-технічної конференції Національного університету "Львівська політехніка" та проміжному звіті про виконання НДР за грантом НФДУ.



## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Aitken, M.J. (1998) An Introduction to Optical Dating, Oxford University Press, Oxford.
2. URL: <https://www.landauer.com/sites/default/files/product-specification-file/50749%20NanoDot%20FDA.pdf>
3. Ya. Zhydachevskii, A. Durygin, A. Suchocki, A. Matkovskii, D. Sugak, P. Bilski, S. Warchol, [Mn-doped YAlO<sub>3</sub> crystal: a new potential TLD phosphor](#), *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B* 227 (2005) 545-550.
4. Ya. Zhydachevskii, A. Suchocki, M. Berkowski, Ya. Zakharko, [Optically stimulated luminescence of YAlO<sub>3</sub>:Mn<sup>2+</sup> for radiation dosimetry](#), *Radiat. Meas.* 42 (2007) 625-627.
5. Я.А. Жидачевський, Люмінесцентні детектори іонізуючого випромінювання на основі ортоалюмінату ітрію, легованого марганцем: дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, Нац. УН-Т «Львівська політехніка», Львів, 2015.
6. S. Ubizskii, D. Afanassyev, Ya. Zhydachevskii, A. Luchechko, V. Rabyk, Set-up for Pulsed OSL Readout of YAP:Mn Dosimetric Detectors, *Proceedings of the 2018 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo-2018)*, Odesa, Ukraine, 2018, Sept. 10-14, 2018, Odessa, Ukraine, pp. 1-4; DOI: [10.1109/UKRMiCo43733.2018.9047561](https://doi.org/10.1109/UKRMiCo43733.2018.9047561).
7. D. Afanassyev, S. Ubizskii, Y. Zhydachevskii, V. Rabyk, V. Paslavsky, [Photon count nonlinearity correction for experimental data processing on pulse excited optically stimulated luminescence](#) of YAP:Mn, *International Scientific and Practical Conference "Electronics and Information Technologies"*, 2018, pp 60-62.
8. M.N. Berberan-Santos, E.N. Bodunov and B. Valeur, Mathematical functions for the analysis of luminescence decays with underlying distributions: 2. Becquerel (compressed hyperbola) and related decay functions, *Chemical Physics*, 317 (2005) 57-62.

9. Э.И. Адирович, Элементарный закон затухания кристаллофосфоров и явление холодной вспышки, Труды ФИАН, 5 (1950) 387-498.
10. Y. Zhydachevskii, A. Suchocki, M. Berkowski, P. Bilski, S. Warchol. Characterization of  $\text{YAlO}_3:\text{Mn}^{2+}$  thermoluminescent detectors, *Radiation Measurements*, 45 (2010) 516-518.
11. Ya. Zhydachevskii, A. Luchechko, D. Maraba, N. Martynyuk, M. Glowacki, E. Bulur, S. Ubizskii, M. Berowski, A. Suchocki, [Time-resolved OSL studies of  \$\text{YAlO}\_3:\text{Mn}^{2+}\$  crystals](#), *Radiat.Meas.* 94 (2016) 18-22.
12. D. Afanassyev, S. Ubizskii, V. Rabyk, V. Paslavsky, Photon count dynamic range determination for optically stimulated luminescence decay measurements in  $\text{YAP}:\text{Mn}$  // *Electronics and information technologies*, Issue 10, Lviv, 2018 – p. 23-30.
13. D. Afanassyev, S. Ubizskii, Ya. Zhydachevskii, V. Rabyk, Photon Counting with Synchronous Background Subtraction for Time Resolved Optically Stimulated Luminescence Readout, *Proceedings of the 2018 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo-2018)*, Odesa, Ukraine, 2018, Sept. 10-14, 2018, Odessa, Ukraine, pp. 1-4; DOI: [10.1109/UKRMiCo43733.2018.9047571](https://doi.org/10.1109/UKRMiCo43733.2018.9047571).
14. Ya. Zhydachevskii, A. Suchocki, M. Berkowski, D. Sugak, A. Luchechko, S. Warchol. Technological approaches for improving thermoluminescent properties of the Czochralski-grown  $\text{YAlO}_3:\text{Mn}$  crystals, *J. Cryst. Growth.*, 310 (2008) 3219-3223.
15. Ya. Zhydachevskii, A. Suchocki, M. Berkowski, S. Warchol, Effect of manganese concentration on thermoluminescent properties of  $\text{YAlO}_3:\text{Mn}$  crystals, *Acta Physica Polonica A*, 117 (2010) 177-180.
16. О. Пошивак, Встановлення режимів оптичного стирання залишкового дозиметричного сигналу у кристалах  $\text{YAP}:\text{Mn}$ , Матеріали 78-ої студентської науково-технічної конференції Національного університету

- "Львівська політехніка". – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2020. – с. 282-284.
17. Y. Li, M. Gecevicius, J. Qiu, Long persistent phosphors – from fundamentals to applications, *Chem. Soc. Rev.*, 45 (2016) 2090-2136.
18. J. Xu, S. Tanabe, Persistent luminescence instead of phosphorescence: History, mechanism, and perspective, *Journal of Luminescence*, 205 (2019) 581-620.
19. G. Swati, V.V. Jaiswal, D. Haranath, Rare-earth doping in afterglow oxide phosphors: Materials, persistence mechanisms, and dark vision display applications, *in book: Spectroscopy of Lanthanide-Doped Oxide Materials*, Elsevier, 2020, 395-425.
20. Э.И. Адирович, Некоторые вопросы теории люминесценции кристаллов, Москва: Государственное издательство технико-теоретической литературы – 1951. – 352 с.