

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Заступник директора з наукової роботи Інституту сцинтиляційних матеріалів НАН України

Олександр СОРОКІН

« 26 » М. Х. А. 2023 р.

ВИТЯГ

з протоколу № 3 спільного засідання відділу наноструктурних матеріалів ім. Ю.В. Малюкіна та Проблемної ради ІСМА «Фундаментальні процеси в люмінесцентних і сцинтиляційних матеріалах» від «23» жовтня 2023 року

ПРИСУТНІ: головуючий на засіданні – завідувач відділу наноструктурних матеріалів ім. Ю.В. Малюкіна член-кореспондент НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор Єфімова Світлана Леонідівна; доктор фізико-математичних наук Сорокін Олександр Васильович; доктор фізико-математичних наук, професор Лисецький Лонгін Миколайович; доктор фізико-математичних наук Семінько Владислав Вікторович; доктор фізико-математичних наук Ващенко Ольга Валеріївна; доктор фізико-математичних наук, професор Сліпченко Микола Іванович; науковий керівник, доктор фізико-математичних наук Тарасенко Олег Анатолійович; доктор технічних наук Беспалова Ірина Ігорівна; кандидат фізико-математичних наук Максимчук Павло Олегович; кандидат фізико-математичних наук Ропаківа Ірина Юріївна; кандидат фізико-математичних наук Вягін Олег Геннадійович; кандидат фізико-математичних наук Губенко Катерина Олександрівна; кандидат фізико-математичних наук Самойлов Олександр Миколайович; кандидат фізико-математичних наук Гранкіна Ірина Ігорівна; кандидат хімічних наук Григорова Ганна Володимирівна; кандидат технічних наук Креч Антон Владиславович; кандидат технічних наук Герасимов Ярослав Віталійович; кандидат технічних наук Тупіцина Ірина Аркадіївна; Асланов Андрій Валерійович; кандидат фізико-математичних наук Ополонін Олександр Дмитрович, кандидат фізико-математичних наук Мартиненко Євгенія Вікторівна.

Серед присутніх 7 докторів фізико-математичних наук і 8 кандидатів фізико-математичних наук – фахівці зі спеціальності, з якої виконувалась дисертація.

СЛУХАЛИ:

1. Результати дисертаційної роботи здобувача ХРОМІЮКА Іларіона Федоровича на тему: «Механізм формування імпульсу затриманої радіолюмінесценції в органічних гетероструктурованих сцинтиляторах та їх

здатність до роздільної реєстрації іонізуючих випромінювань за формою сцинтиляційного імпульсу», поданої на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали.

Науковий керівник – старший науковий співробітник відділу гетероструктурованих матеріалів, доктор фізико-математичних наук ТАРАСЕНКО Олег Анатолійович.

Тема дисертації затверджена на засіданні Вченої ради Інституту сцинтиляційних матеріалів НАН України (протокол № 15 від 16.12.2019 року).

2. Виступ здобувача.

3. Запитання до аспіранта по темі дисертації ставили: член-кореспондент НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор Єфімова Світлана Леонідівна; доктор фізико-математичних наук Семінько Владислав Вікторович; доктор фізико-математичних наук, професор Лисецький Лонгін Миколайович; кандидат технічних наук Герасимов Ярослав Віталійович; кандидат технічних наук Тупіцина Ірина Аркадіївна; доктор фізико-математичних наук Ващенко Ольга Валеріївна.

4. Виступ наукового керівника.

5. В обговоренні дисертаційної роботи взяли участь: член-кореспондент НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор Єфімова Світлана Леонідівна; доктор фізико-математичних наук Сорокін Олександр Васильович.

УХВАЛИЛИ:

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації ХРОМІЮКА Іларіона Федоровича на тему: «Механізм формування імпульсу затриманої радіолюмінесценції в органічних гетероструктурованих сцинтиляторах та їх здатність до роздільної реєстрації іонізуючих випромінювань за формою сцинтиляційного імпульсу», поданої на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали

Обґрунтування вибору теми дослідження.

Органічні монокристалічні та рідкі сцинтилятори добре відомі, а їх оптичні та сцинтиляційні характеристики на даний час достатньо вивчені. Нещодавно з'явився новий тип сцинтиляторів – гетероструктуровані сцинтилятори. Вони представляють собою масиви монокристалічних гранул, з'єднаних за допомогою гарячого пресування (полікристали), або вміщених у прозору несцинтилюючу матрицю (композиційні сцинтилятори). Такі сцинтилятори мають перспективу використання у радіоекології, радіобіології, радіомедицині, дозиметричному контролі, тощо, тому вже були досліджені технологічні особливості їх створення для вирішення різних завдань,

проведені дослідження оптичних, сцинтиляційних характеристик, особливостей світлозбору. Водночас, екситонні процеси, що відбуваються в об'ємі гетероструктурованого зразка, який містить багато хаотично орієнтованих гранул, до моменту початку робіт над дисертаційною роботою не були досліджені, але вони є дуже важливими, адже ці процеси можуть і будуть суттєво відрізнятися від процесів, характерних для ідеальних монокристалів. Разом із тим міграція триплетних екситонів має бути обмежена розміром гранул гетероструктурованих сцинтиляторів, тому розмір гранул набуває істотного значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. Дисертаційна робота виконана в рамках тем наукових досліджень

1) теми Національного фонду досліджень України «Гетероструктуровані органічні сцинтилятори із високою здатністю до розділення іонізуючих випромінювань за формою сцинтиляційного імпульсу для задач радіоекології» (№ держреєстрації 0120U104034, 2020-2021 рр.);

2) теми Національного фонду досліджень України «Розробка ефективних детектуючих систем для задач радіоекології, щодо найбільш шкідливих для людини іонізуючих випромінювань» (№ держреєстрації 0123U102596, 2023-2025 рр.);

3) пошукової теми «Особливості формування радіолюмінесцентного відгуку у органічних матеріалах із стохастичним характером розповсюдження світла» (№ держреєстрації 0122U200141, шифр «Кераміка», 2022 р.);

4) пошукової теми «Розробка нового підходу щодо отримання органічних полікристалічних сцинтиляторів» (№ держреєстрації 0123U101435, шифр «Квазімоно», 2023 р.).

Мета і завдання дослідження.

Метою роботи є з'ясування особливостей фізичних механізмів роздільної реєстрації іонізуючих випромінювань із різними значеннями dE/dx в органічних гетероструктурованих сцинтиляційних матеріалів, а саме, полікристалів та композиційних сцинтиляторів, за формою сцинтиляційного імпульсу.

Для досягнення зазначеної мети необхідно було вирішити наступні задачі:

- дослідити спектри миттєвої, затриманої флуоресценції та фосфоресценції, отримані при кімнатній температурі і при 77 К, органічних гетероструктурованих матеріалів та монокристалів, створених на основі органічних сцинтиляційних речовин. Це дозволяє відокремити миттєву і затриману флуоресценцію;

- дослідити кінетику радіолюмінесценції у цих зразках при збудженні іонізуючими випромінюваннями із питомими енергетичними втратами dE/dx , що відрізняються за порядками величини, такими як альфа-частинки та нейтрони, гамма-кванти;

- дослідити залежність світлового виходу від матеріалу, типу зразка, його розмірів та фракції гранул таких сцинтиляторів при збудженні їх іонізуючими випромінюваннями із різними питомими енергетичними втратами dE/dx ;

- з'ясувати здатність до роздільної реєстрації випромінювань із різними питомими енергетичними втратами dE/dx для отриманих гетероструктурованих органічних сцинтиляторів;

- дослідити форму імпульсу затриманої радіолюмінесценції зразків монокристалів, полікристалів та композиційних зразків на основі органічних сцинтиляторів;

- визначити особливості транспорту та рекомбінації триплетних екситонів у гетероструктурованих органічних сцинтиляторах, застосовуючи результати вищенаведених досліджень.

Об'єкт дослідження.

Об'єктом дослідження є процес рекомбінації триплетних екситонних станів у гетероструктурованих сцинтиляторах.

Предмет дослідження.

Предметом дослідження є люмінесцентні та сцинтиляційні властивості органічних гетероструктурованих сцинтиляторів.

Методи дослідження.

У дисертаційній роботі застосовано такі методи дослідження, як вимірювання спектрів амплітуд сцинтиляцій, вимірювання оптичного пропускання, метод розділення сигналів від швидких нейтронів та фонового гамма-випромінювання шляхом зарядово-часової трансформації, метод вимірювання кінетичних параметрів імпульсів радіолюмінесценції, однофотонним методом, вимірювання спектрів збудження люмінесценції, швидкої та затриманої флуоресценції, методи математичної обробки інформації.

Наукова новизна дослідження: полягає в з'ясуванні особливостей транспорту та рекомбінації триплетних екситонів в органічних гетероструктурованих сцинтиляторах та базується на таких основних положеннях:

1. Вперше запропоновано наступні методи оцінки здатності до розділення за формою імпульсу для органічних сцинтиляторів:

- метод розрахунку внеску повільного компоненту за точкою перегину, особливість якого полягає у розділенні компонент імпульсу радіолюмінесценції використанням подвійного диференціювання експериментальної кривої;

- метод розрахунку внеску повільного компоненту за апроксимацією швидкого компонента, особливість якого полягає у можливості представлення швидкого компоненту простою математичною функцією.

Перевагами цих методів є можливість оперативної числової оцінки здатності до розділення за формою імпульсу органічних сцинтиляторів без застосування математично важких апроксимаційних апаратів, які в основному використовуються на даний момент.

2. Вперше проведено розрахунки просторових коефіцієнтів розмірностей дифузії триплетних екситонів у гетероструктурованих органічних сцинтиляторах на основі ряду популярних органічних сцинтиляційних матеріалів та показано, що у таких середовищах транспорт триплетних станів є ізотропним (просторова розмірність дифузії $l=3$), на відміну від монокристалічних зразків (для яких просторова розмірність дифузії $l=2$)

3. Вперше проведено розрахунки коефіцієнтів дифузії D триплетних екситонів для гетероструктурованих органічних сцинтиляторів на основі ряду популярних органічних сцинтиляційних матеріалів та показано, що за умови використання розмірів гранул, раніше запропонованих як оптимальних для виготовлення таких сцинтиляційних зразків (1,7-2,2 мм), дифузія відбувається у межах однієї гранули. Про це свідчить те, що для органічних монокристалічних та гетероструктурованих зразків одного хімічного складу коефіцієнт D є однаковим, у межах похибки.

4. Вперше експериментально показано ефект відбиття триплетних екситонів на межах гранул органічних сцинтиляційних матеріалів, які входять у гетероструктуровані сцинтилятори. Показано, що такий ефект стає істотним із використанням гранул розміром 60 мкм.

Теоретичне значення.

Дисертація містить нові науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати проведених досліджень, що мають істотне значення для фізики триплетних станів в органічних гетероструктурованих сцинтиляторах, що підтверджується публікаціями в провідних наукових журналах, свідчить про особистий внесок здобувача в науку та характеризується єдністю змісту.

В дисертації вперше досліджується механізм транспорту триплетних екситонних станів (що безпосередньо впливає на формування імпульсу затриманої радіюлюмінесценції) в гетероструктурованих органічних сцинтиляторах. Розглядаються особливості транспорту триплетних екситонних станів в гранулах органічних сцинтиляторів, що мають розмір, порівняний із довжиною дифузійного зсуву триплетного екситонного стану в таких речовинах. Теоретично обґрунтовуються спостережені особливості, притаманні саме таким досліджуваним зразкам.

Практичне значення.

Практичне значення роботи полягає в наступному:

– приведений математичний апарат, що дозволяє обчислювати оптимальний для задачі розділення іонізуючих випромінювань за формою імпульсу розмір гранули органічного гетероструктурованого сцинтилятора при опроміненні випромінюваннями із різними питомими енергетичними втратами.

– результати дисертаційної роботи дозволяють створювати органічні гетероструктуровані сцинтилятори підвищеною здатністю до розділення іонізуючих випромінювань за формою імпульсу за рахунок особливостей, притаманних лише цим середовищам.

Особистий внесок здобувача. Результати, що складають основний зміст дисертації, отримано особисто, а саме:

1. Проведено дослідження спектрів збудження люмінесценції, флуоресценції (як швидкої так і затриманої) монокристалічних, композиційних, полікристалічних та рідких органічних сцинтиляторів, таких як стильбен, *n*-терфеніл та антрацен, в тому числі із варіацією розміру гранул від 0,04 мм до 2,5 мм.

2. Проведено дослідження кінетичних кривих радіolumінесценції монокристалів, полікристалів та композиційних сцинтиляторів на основі стильбену, *n*-терфенілу та антрацену, в тому числі із варіацією розміру гранул від 0,04 мм до 2,5 мм.

3. Проведено дослідження світлового виходу монокристалів, полікристалів та композиційних сцинтиляторів на основі стильбену, *n*-терфенілу та антрацену, в тому числі із варіацією розміру гранул від 0,04 мм до 2,5 мм.

4. Проведено дослідження здатності до розділення із застосуванням методу зарядово-часової трансформації монокристалів та композиційних сцинтиляторів на основі стильбену та *n*-терфенілу, в тому числі із варіацією розміру гранул від 0,1 мм до 2,5 мм.

5. Створено нові теоретичні та математичні інструменти характеристики транспорту та рекомбінації триплетних станів у гетероструктурованих зразках, тобто їх здатності до розділення іонізуючих випромінювань за формою сцинтиляційного імпульсу.

6. На основі літературних даних та запропонованих в дисертаційній роботі теоретичних засад інтерпретовано експериментальні дані.

7. Проведено аналіз значущості вкладу такої особливості транспорту та рекомбінації триплетних станів у гетероструктурованих зразках із розміром гранул 60 мкм, як відбиття триплетних станів від межі монокристалу.

Апробація результатів дослідження.

Результати досліджень, що викладено в дисертації, були представлені автором та обговорені на фахових конференціях, а саме:

- у доповіді на XV Всеукраїнській студентській конференції "Фізика та науково-технічний прогрес", 22-24 квітня 2019 р., Харків, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, у тезах на с.22;
- у доповіді на Міжнародній школі-семінарі для молодих вчених «Функціональні матеріали для технічних та біомедичних застосувань», 09-12 вересня 2019 р., селище Коропове, Зміївський район, Харківська область, Україна, у тезах на с.10;

- у доповіді на XVIII конференції з фізики високих енергій та ядерної фізики 24-27 березня 2020 р., ННЦ ХФТІ, Харків, Україна, у тезах на с.112;
- у доповіді на International workshop for young scientists «Functional materials for technical and biomedical applications», September 09-12, 2020, village Koropovo, Zmiivsky district, Kharkiv region, у тезах на с.27;
- у доповіді на XIX конференції з фізики високих енергій та ядерної фізики, 23-26 березня 2021, Харків, Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», у тезах на с. 53;
- у доповіді на International workshop for young scientists «Functional materials for technical and biomedical applications», village Koropovo, Zmiivsky district, Kharkiv region, September 06 – 10, 2021, у тезах на с.10;
- у доповіді на 11th International Conference on Luminescent Detectors and Transformers of Ionizing Radiation, 12-17.09.2021, Bydgoszcz, Poland, у тезах на с. 27;
- у доповіді на XX конференції з фізики високих енергій та ядерної фізики, 2022 рік, Харків, Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», у тезах на с.45;
- у доповіді на International workshop for young scientists «Functional materials for technical and biomedical applications», September 18 – 20, 2023, у тезах на с.9.

Публікації. За результатами дослідження 6 наукових праць: 3 статті, які опубліковані у наукових фахових виданнях України (2 з них у виданнях проіндексованих в базі даних Scopus та Web of Science Core Collection); 3 статті в іноземних виданнях, проіндексованих в базі даних Scopus та Web of Science Core Collection.

Список опублікованих праць за темою дисертації

Статті у наукових фахових виданнях України:

(які входять до переліку МОН України)

1. Galunov N.Z., Khromiuk I.F. (2019). Separate detection of ionizing radiation with different specific energy losses by organic heterostructured scintillators. *Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна, серія «Фізика», 30*, 10–16. <https://doi.org/10.26565/2222-5617-2019-30-01>.
2. Khromiuk, I.F., Karavaeva, N.L., Krech, A.V., Polupan, Ya. I., Tarasenko, O.A., Galunov, N.Z. (2021). Heterostructured organic scintillators with a high pulse-shape discrimination capability for radioecology problems. *Problems of Atomic Science and Technology, 133*, 56–60. <https://doi.org/10.46813/2021-133-056>.
3. Khromiuk, I.F., Karavaeva, N.L., Krech, A.V., Lazarev, I.V., Martynenko, Ye. V., Tarasenko, O.A., Khabuseva, S.U. (2022). Composite scintillators based on organic grains and their pulse shape discrimination capability. *Problems of Atomic Science and Technology, 141*, 37–41. <https://doi.org/10.46813/2022-141-037>.

Статті в іноземних виданнях:

(статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних *Web of Science Core Collection* та/або *Scopus* (крім видань держави, визнаної Верховною Радою України державою-агресором))

1. Galunov, N. Z., Khromiuk, I. F., and Tarasenko, O. A. (2020). Features of pulse shape discrimination capability of organic heterogeneous scintillators. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 949, Article 162870. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.162870>.
2. Galunov, N.Z., Gryn, D., Karavaeva, N., Khromiuk, I.F., Lazarev, I.V., Navozenko, O.M., Naumenko, A.P., Tarasenko, O.A., Yashchuk, V.M. (2020). Delayed radioluminescence of some heterostructured organic scintillators. *Journal of Luminescence*, 226, Article 117477. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117477>.
3. Khromiuk, I., Galunov N., Karavaeva N., Krech A., Polupan Y., Tarasenko O., Khabuseva S. (2023). Organic heterostructured scintillators with a high pulse shape discrimination capability, *Optical Materials: X*, 18, Article 100234. <https://doi.org/10.1016/j.omx.2023.100234>.

Структура та обсяг дисертації.

Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел. Повний обсяг роботи становить – 165 сторінок, в тому числі 52 – ілюстрації, 22 – таблиці.

Характеристика особистості здобувача.

ХРОМЮК Іларіон Федорович – сформований зрілий фахівець у фізиці процесів взаємодії іонізуючого випромінювання з органічною речовиною. Він самостійно виконує окремі завдання та проявляє ініціативу, основою якої є ґрунтовні знання основ сцинтиляційного процесу. Запропонував власні методи експериментальних досліджень. Відрізняється вмінням знаходити та приймати нестандартні наукові рішення.

Під час виконання дисертаційної роботи ХРОМЮК Іларіон Федорович ретельно опрацював наявні джерела літератури за темою роботи. Він досконало оволодів експериментальними методами досліджень органічних сцинтиляторів. У цьому йому допомогло глибоке засвоєння уявлень про фізичні процеси, які відбуваються в органічному середовищі при радіаційному збудженні. Він самостійно провів значну кількість експериментів, їх науковий аналіз та оформив результати досліджень у вигляді наукових публікацій, які мають безпосереднє відношення до основних завдань дисертаційної роботи та були до неї включені.

ХРОМЮК Іларіон Федорович відрізняється відповідальним ставленням до своїх посадових обов'язків, сумлінною працею, професійною майстерністю. Він достатньо вільно спілкується українською та англійською мовами, увічливий, комунікабельний та працелюбний. Його характеризує відданість своїй справі.

Оцінка мови та стилю дисертації. Дисертація виконана фаховою українською мовою, текстове подання матеріалу відповідає стилю науково-дослідної літератури.

У результаті попередньої експертизи дисертації **ХРОМЮКА Іларіона Федоровича** і повноти публікації основних результатів дослідження

УХВАЛЕНО:

1. Затвердити висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації ХРОМЮКА Іларіона Федоровича на тему: «Механізм формування імпульсу затриманої радіолюмінесценції в органічних гетероструктурованих сцинтиляторах та їх здатність до роздільної реєстрації іонізуючих випромінювань за формою сцинтиляційного імпульсу».

2. Констатувати, що за актуальністю, ступенем наукової новизни, обґрунтованістю, науковою та практичною цінністю здобутих результатів дисертація ХРОМЮКА Іларіона Федоровича відповідає спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали та вимогам Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у закладах вищої освіти (наукових установах), затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 23 березня 2016 р. № 261, пп. 6, 7, 8 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

3. Рекомендувати дисертацію ХРОМЮКА Іларіона Федоровича на тему: «Механізм формування імпульсу затриманої радіолюмінесценції в органічних гетероструктурованих сцинтиляторах та їх здатність до роздільної реєстрації іонізуючих випромінювань за формою сцинтиляційного імпульсу» до захисту на здобуття ступеня доктора філософії у разовій спеціалізованій вченій раді за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали.

4. Рекомендувати вченій раді Інституту сцинтиляційних матеріалів НАН України затвердити такий склад разової спеціалізованої вченої ради:

Голова ради:

Єфімова Світлана Леонідівна, член-кореспондент НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач відділу наноструктурних матеріалів імені Ю.В. Малюкіна Інституту сцинтиляційних матеріалів НАН України.

Рецензенти:

Сорокін Олександр Васильович, доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, заступник директора з наукової роботи Інституту сцинтиляційних матеріалів НАН України.

Жмурін Петро Миколайович, доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу досліджень люмінесцентних властивостей матеріалів Інституту сцинтиляційних матеріалів НАН України.

Офіційні опоненти:

Волошиновський Анатолій Степанович, доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри експериментальної фізики Львівського національного університету ім. Івана Франка.

Трефілова Лариса Миколаївна, доктор фізико-математичних наук, професор, старший науковий співробітник Національного університету цивільного захисту України.

Результати голосування щодо рекомендації до захисту дисертації ХРОМЮКА Іларіона Федоровича:

«За» – 21

«Проти» – немає

«Утримались» – немає

Презентація ХРОМЮКА Іларіона Федоровича на 20 стор. додається.

Головуючий на засіданні

завідувач відділу наноструктурних матеріалів ім. Ю.В. Малюкіна, член-кореспондент НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор



Світлана ЄФІМОВА

Секретар засідання

науковий співробітник відділу наноструктурних матеріалів ім. Ю.В. Малюкіна, кандидат фізико-математичних наук



Ірина РОПАКОВА