

Голові разової спеціалізованої
вченої ради Інституту
сцинтиляційних матеріалів
Національної академії наук України,
члену-кореспонденту НАН України,
доктору фізико-математичних наук,
професору
Єфімовій Світлані Леонідівні

ВІДГУК

**Офіційного опонента, доктора фізико-математичних наук, професора,
завідувача кафедри експериментальної фізики Львівського національного
університету імені Івана Франка**

Волошиновського Анатолія Степановича

на дисертаційну роботу

Хромюка Іларіона Федоровича

«Механізм формування імпульсу затриманої радіолоюмінесценції в органічних гетероструктурованих сцинтиляторах та їх здатність до роздільної реєстрації іонізуючих випромінювань за формою сцинтиляційного імпульсу», подану до захисту у разову спеціалізовану вчену раду Інституту сцинтиляційних матеріалів Національної академії наук України на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали галузі знань 10 Природничі науки

Актуальність обраної теми дисертації.

Органічні монокристалічні та рідкі сцинтилятори добре відомі своїм широким колом практичного застосування. Фізичні процеси розміну енергії іонізуючого випромінювання, які формують швидку та затриману радіолоюмінесценцію в таких системах, досліджувалися починаючи з робіт Біркса. 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, для задач аналізу потоків електромагнітного випромінювання та частинок. В основі розуміння процесів, які використовуються для дискримінації гама-нейтронних потоків за допомогою гетероструктурованих сцинтиляторів, лежить явище затриманої радіолюмінесценції. У випадку достатньої густини збудження та міграції триплетних екситонів виникають умови для виникнення обмінної взаємодії між такими триплетними станами близьких молекул, яка супроводжується їхньою анігіляцією з передачею енергії до синглетного екситона. Молекула, яка знаходиться у синглетному стані, випромінює, не змінюючи спектр люмінесценції, але зі значною затримкою в часі, що зумовлено релаксацією іонів для їх зближення та виникнення триплет-триплетної анігіляції. Залежність інтенсивності затриманої компоненти від густини збудження, відмінність часових параметрів швидкого та повільного компонент імпульсу радіолюмінесценції є визначальними для використання затриманої люмінесценції як маркера дискримінації гама-нейтронних потоків. Оскільки, імовірність триплет-триплетної анігіляції значною мірою залежить від міграції триплетних екситонів, то з'ясування особливостей дифузійних властивостей екситонів залежно від розмірів гранул мікрокристалів є визначальним дослідженням для цієї дисертаційної роботи. Можна очікувати, що екситонні процеси, які відбуваються в об'ємі гетероструктурованого зразка, який містить багато хаотично орієнтованих гранул, будуть 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 для затриманої радіолюмінесценції, особливо, з урахуванням ефекту відбиття екситонів від межі гранул.

Дисертаційна робота є відображенням тих передових напрацювань в галузі сцинтиляційного матеріалознавства, які успішно розвиваються та впроваджуються в Інституті сцинтиляційних матеріалів НАН України. Стосовно проблеми дискримінації потоків - це і неорганічні та органічні монокристали, і перехід до структурованих сцинтиляторів, і спроби отримання дискримінаторів на основі активованих полімерів.

Актуальність дисертаційної роботи і вагомість отриманих результатів підтверджується тим, що вона виконувалась в межах наукових проєктів, зокрема

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.).

Загальна характеристика роботи та отриманих у ній результатів.

Дисертаційна робота Хромюка Іларіона Федоровича складається із вступу, п'яти розділів з висновками, загальних висновків та списку використаних джерел. Робота викладена на 165 сторінках; містить 52 рисунки і 22 таблиці по тексту; список використаних літературних джерел із 104 найменувань.

Вступ містить обґрунтування актуальності теми дисертації, мету та завдання дослідження, в ньому визначається предмет та об'єкт досліджень, приведено методи досліджень, визначено наукову новизну та практичне значення дисертаційної роботи. Приведено наукові програми, в рамках яких здійснено дослідження, вказано особистий внесок здобувача, наведено дані про апробацію і публікацію результатів дослідження, визначені обсяг та структура дисертації.

Перший розділ присвячено висвітленню фізичних основ, на яких базуються дослідження, проведені в рамках дисертаційної роботи. Зазначені вже відомі параметри як досліджуваних зразків, так і суміжних видів сцинтиляторів. Проведений літературний огляд за напрямком досліджень та обґрунтовано необхідність дослідження фізичних механізмів появи, міграції та рекомбінації триплетних екситонів у гетероструктурованих сцинтиляторах за умови просторового обмеження розмірами гранули органічного сцинтилятора.

Другий розділ містить інформацію про методик отримання та обробки експериментальних даних. Зазначені прилади та схеми установок, що були використані для досліджень. Також наведено технологію отримання

експериментальних зразків, необхідних для виконання задач дисертаційної роботи. Окремо в розділі приведені запропоновані автором методи оцінки здатності сцинтиляторів до розділення іонізуючих випромінювань.

Третій розділ містить переважно отримані в ході виконання задач дисертаційної роботи експериментальні дані. Наведені геометричні параметри та приведені зображення використаних зразків. Кратко проведено якісний аналіз отриманих масивів даних. Визначені особливості експериментальних установок, що могли впливати на отримані дані.

Четвертий розділ присвячено обробці та аналізу даних, отриманих при збудженні досліджуваних зразків іонізуючим випромінюванням. На основі отриманих даних автор дисертаційної роботи зробив обґрунтований висновок, що для досліджуваних гетероструктурованих сцинтиляторів розповсюдження триплетних екситонів, по-перше, має ізотропний характер, а по-друге, процес рекомбінації триплетних станів відбувається у межах однієї гранули. Використовуючи отримані експериментальні дані, автором показано що запропоновані ним способи кількісної оцінки здатності до розділення іонізуючих випромінювань за формою імпульсу корелюють із фізичними властивостями досліджуваних сцинтиляторів і можуть бути використані в подальшому. Автором вперше проаналізовано параметри ефективності дискримінації (FOM) для оптимального вибору фракцій гранул, із яких формувалися композиційні сцинтилятори на основі стильбену та чистого *n*-терфенілу.

У п'ятому розділі дисертантом проведено обробку та аналіз результатів оптичного пропускання та люмінесценції зразків. За допомогою аналізу спектрів люмінесценції як твердих, так і рідких зразків при кімнатній температурі та у рідкому азоті обчислені енергії першого збудженого синглетного та триплетного станів для стильбену, *n*-терфенілу та антрацену. Показано, що збудження оптичним випромінюванням у перший триплетний стан приводить до появи спектрів затриманої флуоресценції. При цьому спостерігається зростання інтенсивності затриманої флуоресценції зі зменшенням розміру гранул для одношарових зразків, які складаються з гранул малих розмірів. Зазначається, що підґрунтям для такого ефекту є можливість відбиття триплетних екситонів на межі гранули.

Висновки сформульовані відповідно до поставлених завдань, базуються на результатах комплексу теоретичних і експериментальних досліджень та відповідають основному змісту дисертаційної роботи.

Повнота викладу основних результатів дисертації в опублікованих працях

Аналіз наукових публікацій автора дає підстави вважати, що вони повною мірою відбивають основні положення дисертації.

Основний зміст дисертаційної роботи Хромюка Іларіона Федоровича викладений у 6 наукових працях, з яких 5 статей включені до міжнародної наукової бази даних SCOPUS, 3 статі у фахових виданнях України. Результати апробовані на 9 конференціях.

Оприлюднення основної частини матеріалу дисертації у виданнях, що входять до наукометричної бази Scopus, в т.ч. таких високорейтингових, як Journal of Luminescence (Q2), Nuclear Instruments and Methods: B (Q2), Optical Materials: X (Q2), а також h -індекс = 2 свідчать про високий науковий рівень роботи та визнання праць Хромюка І.Ф. у науковому світі.

Значущість дослідження для науки і практики.

До найбільш вагомих наукових положень, отриманих результатів виконання даної роботи, на мій погляд відносяться такі:

1. Автором запропоновані та перевірені два нових методи оцінки здатності органічних сцинтиляторів до розділення іонізуючих випромінювань за формою імпульсу, такі як відокремлення компонентів сцинтиляційного імпульсу подвійним диференціюванням, та апроксимацією швидкого компонента. Ці методи дають можливість оперативної числової оцінки здатності органічних сцинтиляторів до розділення за формою імпульсу.

2. Автор вперше розраховував, базуючись на експериментальних даних, значення просторових розмірностей дифузії триплетних екситонів в органічних гетероструктурованих сцинтиляторах, чим показав необхідність врахування ізотропності руху триплетних екситонів у таких середовищах.

3. Вперше отримавши значення коефіцієнтів дифузії триплетних екситонів для ряду органічних гетероструктурованих сцинтиляторів на основі стильбену, n -терфенілу та антрацену, автор обґрунтовано зробив висновок про обмеження транспорту триплетних екситонів розмірами однієї гранули.

4. Спираючись на два попередніх пункти, а також запропоновану автором модель обмеження руху триплетних екситонів, обчисливши критичний розмір гранули органічного сцинтилятора при опроміненні його альфа-частинками енергії 5 MeV, автором проведено серію досліджень із варіацією розмірів гранул від 40 мкм та експериментально показано різке підвищення

інтенсивності затриманої флуоресценції та світлового виходу гранул розміром 60 мкм для досліджуваних речовин за рахунок відбиття триплетних екситонів від межі гранули та підвищення таким чином кількості актів їх рекомбінації.

Крім зазначеної наукової новизни, результати дисертаційної роботи Хромюка Іларіона Федоровича, на мій погляд, мають важливе практичне застосування, адже запропоновані методики та матеріали можуть бути рекомендовані для виробництва гетероструктурованих органічних сцинтиляторів, які демонструють більший світловий вихід, мають достатні розміри та вищу здатність до розділення іонізуючих випромінювань за формою сцинтиляційного імпульсу за рахунок покращення рекомбінації триплетних екситонів в таких середовищах.

Дискусійні положення та зауваження до дисертації.

1. Переходячи від використання об'ємних органічних монокристалів до мікрочисталів як основи гетеросцинтилятора автору варто би було обговорити проблему радіаційної стійкості гетероструктурованих сцинтиляторів.

2. Перехід від монокристалів до дрібних зерен у випадку структурованих сцинтиляторів призводить до зростання дефектів, які можуть впливати на часові параметри швидкої та затриманої люмінесценції і цим впливати на ефективність дискримінації потоків.

3. Визначивши критерій успішного розділення гама-нейтронних потоків (значення FOM) для досліджуваних зразків автор не використовує його для класифікації сцинтиляторів за ефективністю дискримінації, з урахуванням, що для впевненого розділення сигналів необхідне виконання умови - $FOM > 1,27$.

При цьому наведені зауваження ніяким чином не впливають на якість та високий рівень дисертаційної роботи та її наукове та практичне значення.

Відсутність порушень академічної доброчесності.

Під час виконання дисертації здобувач дотримувався принципів академічної доброчесності. За результатами перевірки та аналізу матеріалів дисертації не було виявлено ознак академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації.

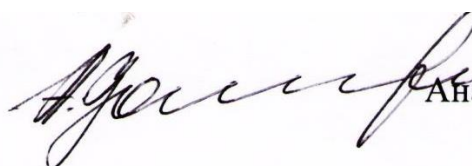
Загальний висновок та оцінка дисертації.

Вважаю, що за актуальністю, новизною, рівнем і достовірністю отриманих наукових результатів дисертація Хромюка Іларіона Федоровича «Механізм

формування імпульсу затриманої радіолюмінесценції в органічних гетероструктурованих скінтіляторах та їх здатність до роздільної реєстрації іонізуючих випромінювань за формою скінтіляційного імпульсу» повністю відповідає всім вимогам «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, а її автор, Хромюк Іларіон Федорович, безумовно заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали галузі знань 10 Природничі науки.

Офіційний опонент:

доктор фізико-математичних наук,
професор, завідувач кафедри
експериментальної фізики
Львівського національного університету
імені Івана Франка


Анатолій ВОЛОШИНОВСЬКИЙ

Особистий підпис А. С. Волошиновського засвідчую:

Вчений секретар
Львівського національного університету
імені Івана Франка, доцент


Ольга ГРАБОВЕЦЬКА

