УДК 661:548.55; 661.539.1.074; 661.143
№ держреєстрації 0121U112061
Інв. №

Національна академія наук України
Інститут сцинтиляційних матеріалів
61072, м. Харків, пр. Науки, 60, тел. (057) 341-01-61, 340-44-74

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ІСМА НАН України
Академік НАН України

_____ Б.В. Гриньов

15 грудня 2021 р.

ЗВІТ
про науково-дослідну роботу
(за договорами № 189/01.2020 від 5 листопада 2020 року та № 186/01/0133 від 17 травня 2021 року)

«Гетероструктуровані органічні сцинтилятори із високою здатністю до розділення іонізуючих випромінювань за формою сцинтиляційного імпульсу для задач радіоекології»

грантова підтримка Національного фонду досліджень України у межах конкурсу «Наука для безпеки людини та суспільства»
(заключний)

Керівник: старший науковий співробітник,
доктор фіз. мат. наук О.А. Тарасенко

2021 рік

Результати робот розглянуто на засіданні Вченої ради Інституту сцинтиляційних матеріалів Національна академія наук України, протокол № 13 від 10.12. 2021р.

СПИСОК АВТОРІВ

Керівники проєкту:

Завідуючий відділом, доктор фізико-математичних наук, професор	М.З. Галунов

Заміна керівника проєкту у зв'язку зі смертю М.З. Галунова

Старший науковий співробітник, доктор фізико-математичних наук	О.А. Тарасенко (реферат, вступ, розділи 1, 2 та 3, висновки)

Відповідальні виконавці:

Старший науковий співробітник, кандидат технічних наук	Н.Л. Караваєва (вступ, розділи 1, 2 та 3, висновки)
Старший науковий співробітник, кандидат технічних наук	А.В. Кречет (реферат, вступ, розділи 1, 2 та 3, висновки)

Виконавці:

Науковий співробітник, кандидат технічних наук	І.В. Лазарєв (розділ 1)
Науковий співробітник, кандидат технічних наук	С.С. Міненко (розділ 3)
Провідний інженер-електронік	С.В. Махота (розділи 1, 2 та 3)
Провідний інженер	І.Ф. Хромюк (розділи 2 та 3)
Провідний інженер	Я.І. Полупан (розділи 1 та 3)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 82 с., 6 табл., 57 рис., 7 дод., 25 джерел.

СТИЛЬБЕН, *n*-ТЕРФЕНІЛ, *T–T* АНІГІЛЯЦІЯ, МОНОКРИСТАЛ, ГЕТЕРОСТРУКТУРОВАНІ СЦИНТИЛЯТОРИ, КОМПОЗИЦІЙНІ СЦИНТИЛЯТОРИ, ПОЛІКРИСТАЛІЧНІ СЦИНТИЛЯТОРИ.

Метою роботи є розробка матеріалів для роздільної реєстрації іонізуючих випромінювань; вивчення фізичних механізмів, які визначають здатність цих матеріалів розділяти випромінювання з різними питомими втратами енергії.

Виконавці: Інститут сцинтиляційних матеріалів НАНУ (надалі ІСМА) і *співвиконавець* Київський національний університет ім. Тараса Шевченко (надалі КНУ).

Реалізації мети проекту базується на вирішенні трьох взаємопов'язаних задач: 1) розробка матеріалів для роздільної реєстрації іонізуючих випромінювань, що є найбільш небезпечними для людського організму і тих, що є фоновими, на основі нових сцинтиляційних матеріалів - органічних гетероструктурованих сцинтиляторів; 2) вивчення фізичних механізмів, які визначають здатність цих матеріалів розділяти випромінювання з різними питомими втратами енергії за формою імпульсу радіолюмінесценції; 3) отримання матеріалів найбільш ефективних щодо задач радіоекології та моніторингу наслідків техногенних радіаційних катастроф.

В результаті виконання роботи:

1. Вирощено органічні монокристали на основі стильбену та *n*-терфенілу. Отримано зразки гетероструктурованих сцинтиляторів із різним розміром гранул на основі стильбену та *n*-терфенілу.

2. Показано, що через відмінності механізмів формування миттєвої і затриманої флуоресценції, залежності інтенсивності світіння від розміру гранул суттєво відрізнялися для радіаційного збудження та збудження фотонами світла.

3. При постійному збудженні світлом в область поглинання триплетних екситонів:

3.1. Виявлено пік, із енергією фотонів світла, яка відповідала енергії подвійній енергії триплетних екситонів ($2\varepsilon(T_1)$). Цей пік відповідає енергії злиття двох T_1- станів (пряме світіння зі збудженого синглетного стану).

3.2. Спостерігався спектр флуоресценції, спектральний склад якого був аналогічний спектру миттєвої флуоресценції. За умовами експерименту збудження це можливе лише через злиття триплетних екситонів. Через заборону по мультиплетності, його інтенсивність досягала декількох відсотків від інтенсивності падаючого світла.

3.3. Найменше значення інтенсивності сповільненої флуоресценції I_D було отримано для монокристалів. Найбільше значення I_D спостерігалося для композиційних сцинтиляторів, що містять гранули з розмірами меншими за 0,06 мм.

ABSTRACT

STILBENE, *p*-TERPHENYL, T-T ANNIHILATION, SINGLE CRYSTAL, HETEROSTRUCTURED SCINTILLATORS, COMPOSITE SCINTILLATORS, POLYCLYSTALLINE SCINTILLATORS

The aim of the work is to develop materials for separate detection of ionizing radiations; to study the physical mechanisms that determine the ability of these materials to separate radiations with different specific energy losses.

Participants: Institute for Scintillation Materials of NASU (ISMA) and Taras Shevchenko Kyiv National University. (KNU).

The goal of the project is based on solving three interrelated tasks: 1) the development of materials for separate detection of ionizing radiations, which are most dangerous to the human body and those that are background, based on new scintillation materials, i.e organic heterostructured scintillators; 2) the study of physical mechanisms that determine the ability of these materials to separate radiation with different specific energy losses by the shape of the radioluminescence pulse; 3) obtaining materials that are most effective for radioecology tasks and monitoring the consequences of man-made radiation disasters.

Main results of work:

1. Organic single crystals based on stilbene and *p*-terphenyl were grown. Samples of heterostructured scintillators with different grain sizes based on stilbene and *p*-terphenyl were obtained.

2. It is shown that due to differences in the mechanisms of formation of the fast and the delayed fluorescence, the dependencies of the luminosity intensity on the size of the grains differed significantly for the radiation excitation and for the excitation by photons of light.

3. With constant excitation by light in the region of absorption of triplet excitons:

3.1. We observed the peak with the energy of photons of light, which corresponded to the double energy of triplet excitons ($2\varepsilon(T_1)$). This peak corresponds to the fusion energy of two T_1-states (the direct luminescence from the excited singlet state).

3.2. A fluorescence spectrum was observed, the spectral composition of which was similar to the fast fluorescence spectrum. Under the conditions of the excitation, this is possible only through the recombination of triplet excitons. Due to inhibit on multiplicity, its intensity reached several percept of the intensity of incident light.

3.3. The lowest value of the intensity of the delayed fluorescence I_D was obtained for single crystals. The highest I_D-value was observed for composite scintillators containing grains smaller than 0.06 mm.

ЗМІСТ

ВСТУП……..7
1. ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ОТРИМАННЯ СЦИНТИЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ…….11
1.1. Вихідні матеріали……11
1.2. Монокристалічні сцинтилятори……..12
1.2.1. Підготовка ампул, очищення сировини та вирощування монокристалів *n*-терфенілу……..12
1.2.2. Підготовка ампул, очищення сировини та вирощування монокристалів стильбену……15
1.2.3. Установка для очищення сировини та вирощування органічних монокристалів……16
1.3. Гетероструктуровані сцинтилятори……...19
1.3.1. Отримання кристалічних гранул *n*-терфенілу та стильбену……..19
1.3.2. Технологічні особливості створення полікристалів……22
1.3.3. Технологічні особливості створення композиційних сцинтиляторів……..…..23
2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ……..26
2.1. Метод вимірювання світлового виходу сцинтиляторів……26
2.2. Метод вимірювання оптичного пропускання зразків……...29
2.3. Метод ідентифікації іонізуючого випромінювання за формою сцинтиляційного імпульсу……..30
2.4. Однофотонний метод (із кореляцією у часі) дослідження повільного компоненту імпульсу радіолюмінесценції……32
2.5. Методи дослідження спектрів поглинання, миттєвої і затриманої флуоресценції, а також фосфоресценції органічних сцинтиляторів при кімнатній температурі та 77 K……...34
3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ…….37

3.1. Світловий вихід зразків композиційних сцинтиляторів стильбену та *n*-терфенілу……...…...38
3.2. Оптичне пропускання зразків композиційних сцинтиляторів стильбену та *n*-терфенілу……..47
3.3. Спектри поглинання, швидкої та затриманої флуоресценції, фосфоресценції органічних сцинтиляторів при кімнатній температурі та при 77 К……52
3.4. Результати вимірювання спектрів люмінесценції…….55
3.5. Результати вимірювань форми імпульсу радіолюмінесценції зразків композиційних сцинтиляторів стильбену…….71
ВИСНОВКИ……...75
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ…….77
ПЕРЕЛІК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ПРОЄКТОМ……..80
ДОДАТКИ……..82

ВСТУП

Питання реєстрації потоків іонізуючих випромінювань малої інтенсивності є дуже актуальними в сучасних екологічних, біологічних, медичних, геологічних задачах, при пошуку ефективних засобів перешкоджання несанкціонованого провозу ядерного пального та інших радіоактивних матеріалів, при ліквідації наслідків техногенних катастроф. Кількісна характеристика, яка визначає ступінь впливу іонізуючого випромінювання на організм людини є добутком дози випромінювання, яке поглинуто людиною, на значення величини радіаційно-вагового фактору ω_R. Останній визначає довготерміновий вплив (можливість виникнення, в першу чергу, таких тяжких захворювань, як рак та лейкемія) низько інтенсивної хронічної дози. Основна частина енергетичного нейтронного спектр у природних радіонуклідів, що діляться, чи можливих випромінювань навколо атомних станцій, які виникають у наслідок аварій, має енергію $E_n \leq 2$ МеВ. Якщо для фотонів гамма випромінювання $\omega_R = 1$, то для альфа-частинок, швидких нейтронів з енергіями $E_n \leq 2$ МеВ величина $\omega_R = 20$. Такі ж великі значення радіаційно-вагового фактору ($\omega_R = 20$) мають альфа-частинки та ядра важких іонізованих атомів. [1]. Це означає, що якщо точний прилад точно підраховує кількість записаних подій, не розділяючи їх за своєю природою, то така інформація не відповідає реальній ситуації, а її використання є небезпечним.

Для спектрометрії швидких нейтронів необхідні середовища із великим вмістом водню. Тому оптимальними є органічні молекулярні матеріали. Завдяки малим значенням A і Z ядер вуглецю і водню ці матеріали із густиною, яка близька до 1 г/см^3 мають практичне нульове зворотне розсіяння для заряджених частинок. Це збільшує ефективність і стабільність реєстрації заряджених частинок у порівнянні із неорганічними сцинтиляторами.

Нажаль, технологія отримання органічних монокристалів вносить жорсткі обмеження на їх максимальні розміри та форму і є достатньо коштовною. Рідинні сцинтилятори є токсичними і пожеже-небезпечними [2].

Для вирішення цієї проблеми в запиті пропонується вивчення більш перспективних нещодавно створених гетероструктурованих сцинтиляційних матеріалів нових типів [2, 3–6]. Це органічні сцинтилятори, які містять сцинтиляційні гранули, що з'єднують за рахунок спікання при гарячому пресуванні (полікристали – тобто Ван-дер-Вальсова кераміка), або вводяться у прозору гель-композицію (композиційні сцинтилятори).

Іонізуючі випромінювання генерують в таких сцинтиляторах два типи люмінесцентного відгуку – швидку та затриману радіолюмінесценцію. Іонізуючі випромінювання з великими значеннями питомих енергетичних втрат (*dE/dx*) (ядра віддачі, нейтрони, альфа-частинки, електрони низьких енергій) генерують сцинтиляційний імпульс із великим внеском повільного компоненту. Випромінювання з малими значеннями *dE/dx* (фотони рентгенівського і гамма випромінювання, електрони середніх та високих енергій) генерують сцинтиляційні імпульси з малим внеском повільного компоненту. Повільний компонент виникає в результаті процесу триплет-триплетної (*T*-*T*) анігіляції локалізованих триплетних молекулярних екситонів (далі *T*-станів) [2, 7, 8]. При наявності ефективного дифузійного транспорту *T*-станів вони отримують можливість локалізуватися на сусідніх молекулах, тобто наблизитися один до одного на таку відстань, де стає можливим обмінно-резонансний механізм їх взаємодії. Тобто внесок повільного компоненту в сумарний сцинтиляційний сигнал буде визначатися ефективністю транспорту *T*-станів у конкретному сцинтиляційному матеріалі, а також здатність матеріалу до розділення сигналів від випромінювань із різними питомими енергетичними втратами *dE/dx*. Для класичних органічних монокристалів і рідин їх здатність до розділення сигналів від випромінювань із різними *dE/dx* є відомим експериментальним фактом, також добре вивчені й особливості транспорту та рекомбінації *T*-станів в них. Така інформація для

гетероструктурованих матеріалів, практично відсутня. Разом із тим, на інтуїтивному рівні очевидно, що ці особливості можуть бути різними для суцільних середовищ і гетероструктурованих матеріалів, для яких міграція *T*-станів має бути обмежена розміром гранул, з яких вони складаються.

Виходячи із вищенаведеного, у проєкті було вивчено:

1. Миттєву, затриману флюоресценцію та фосфоресценцію гетероструктурованих матеріалів і (для порівняння) монокристалів при кімнатній температурі і при 77 K. Затримана флюоресценція і фосфоресценція вимірюються з затримкою після збудження, яка суттєво перевищує час висвітлювання флуоресценції. Це дозволить відокремити миттєву і затриману фосфоресценцію. Фосфоресценція і флюоресценція відрізняються за спектром.

2. Кінетику радіолюмінесценції при збудженні іонізуючими випромінюваннями із *dE/dx*, що відрізняються за порядками величини.

3. Світловий вихід сцинтиляторів при збудженні іонізуючими випромінюваннями із різними *dE/dE*.

4. Здатність до роздільної реєстрації випромінюваннями із різними *dE/dx* на спеціально створеній апаратурі,

5. Форму імпульсу затриманої радіолюмінесценції зразків монокристалів, полікристалів та композиційних сцинтиляторів із різним розміром кристалічних гранул.

Мета першого етапу робіт (листопад 2020 – грудень 2020): розробка вихідних матеріалів на основі гетероструктурованих сцинтиляторів для роздільної реєстрації іонізуючого випромінювання методом дискримінації за формою імпульсу радіолюмінесценції; отримання тонких органічних гетероструктурованих сцинтиляторів.

Мета другого етапу робіт (травень 2021 – серпень 2021): отримання та проведення дослідження зразків органічних гетероструктурованих матеріалів на основі стильбену і *n*-терфенілу із різним розміром кристалічних гранул.

Мета третього етапу робіт (жовтень 2021 – грудень 2021): провести аналіз експериментальних даних та описати фізичні механізми, які визначають роздільну здатність нових типів органічних гетерогенних матеріалів. Вивчити фізичні механізми впливу процесу триплет-триплетної анігіляції у гетероструктурованих сцинтиляторах із різним розміром гранул на їх здатність до роздільної реєстрації іонізуючих випромінювань різних типів.

РОЗДІЛ 1
ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ОТРИМАННЯ СЦИНТИЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Невід'ємною частиною результатів проекту є ті результати, що описані виконавцями у роботах [7, 8], що опубліковані у 2020 р. Ці результати склали основу доробку по цьому проекту. Саме у цих роботах була обґрунтована мета проекту і було доведено наступне. Для реалізації мети проекті необхідно отримати і провести порівняльний аналіз здатності до розділення за формою сцинтиляційного імпульсу органічних монокристалів *транс*-стильбену і *п*-терфенілу, а також гетероструктурованих сцинтиляторів, які містять гранули *транс*-стильбену, або *п*-терфенілу. Ці результати мають бути порівнянні із результатами, які отримано для перерахованих вище матеріалів, при збудженні, як світлом у ультрафіолетовому діапазоні (для збудження реакції ділення синглетних екситонів), так і іонізуючими випромінюваннями (альфа-гамма- і швидкі нейтрони). Важливим результатом цих робіт є обґрунтування необхідності порівняння вищезгаданих досліджень для гетероструктурованих матеріалів, які містять гранули різних розмірів.

Розміри гранули мають визначати умови дифузії триплетних станів, тобто умови формування затриманої люмінесценції і, в кінцевому рахунку, здатність матеріалу до дискримінації сигналів від випромінювань із різними питомими енергетичними втратами dE/dx (що мають енергію E і довжину пробігу в матеріалі x) по формі їх сцинтиляційного імпульсу.

1.1. Вихідні матеріали

Стильбен і *п*- терфеніл – органічні матеріали які мають використовуватися у наших дослідженнях. Для виготовлення сцинтиляторів із *п*-терфенілу ми брали комерційно доступну сировину, яку ретельно чистили. Для виготовлення сцинтиляторів із стильбену ми синтезували сировину самі. Використання стильбену провідних фірм не дозоляє отримувати сцинтилятори

з необхідно високим характеристиками [9]. Наші попередні дослідження (див., наприклад, [2]), дозволили ідентифікувати домішки, які лімітують характеристики матеріалу. Синтез стильбену складається, безпосередньо, з синтезу, піролізу і перекристалізації. На стадії синтезу використання звичайної магнітної мішалки мало свої вади, а тому використання колбонагрівача збільшує продуктивність, якість та безпеку процесу. Основними речовинами у синтезі стильбену є гідразіну сульфат, бензальдегід, їдкий натрій, та ізопропіловий спирт. Бензальзін, напівпродукт, який отримується після синтезу, та після піролізу перетворюється на стильбен. Перекристалізація останнього у діхлоретані дозволяє отримати сировину, що використовується для вирощування монокристалів.

1.2. Монокристалічні сцинтилятори

Були вирощені органічні монокристалічні сцинтилятори на основі *n*-терфенілу та стильбену.

1.2.1. Підготовка ампул, очищення сировини та вирощування монокристалів n-терфенілу

Із скла «Пірекс» виготовляються ампули для очищення сировини *n*-терфенілу (рисунок 1.1) і для вирощування монокристалів (рисунок 1.2).

Рисунок 1.1. Ампула для очищення сировини *n*-терфенілу.

Рисунок 1.2. Ампула для вирощування монокристалів.

Перед заповненням ампули ретельно миються і висушуються. Потім ампула для очищення сировини заповнюється і на газовій горілці плавиться *n*-терфеніл, після чого об’єм сировини, який знаходиться в ампулі зменшується у два рази. Операцію повторюють три-чотири рази. Із заповненої ампули на стенді підготовки ампул відкачують повітря і заповнюють аргоном. Операцію повторюють три рази. При останньому заповнені аргоном залишають невисокий вакуум (0,7 0,8 від атмосферного тиску). Після цього ампулу відпаюють. Відпаяну ампулу поміщують до установки зонної плавки (рисунок 1.3) яка має чотири зони, де вона переміщується вверх зі швидкістю 10 мм/год.

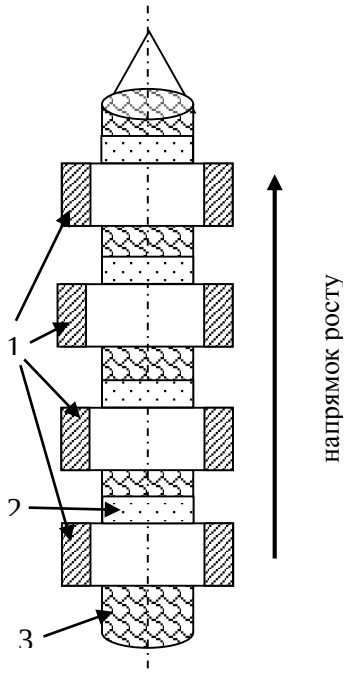

Рисунок 1.3. Схема устаткування для зонного очищення.

Після того як ампула виходить із верхньої зони цю операцію повторюють ще два рази. Після зонного очищення ампулу з очищеною сировиною (рисунок 1.4) розбивають і забирають верхню половину очищеного злитку для заповнення ростової ампули.

Рисунок 1.4. Ампула з очищеною сировиною *n*-терфенілу.

Перед заповненням ростової ампули у нижній частині ампули встановлюють зародок з орієнтованого монокристалу. При заповненні ростової ампули зважують очищений *n*-терфенілу, що засипається, для того щоби додати 1,4-дифеніл-1,3-бутадієн у кількості 0,3 % від маси *n*-терфенілу, якщо це необхідно. Підготовка ростової ампули подібна до підготовки ампули для очищення. Підготовлену ампулу розміщують у верхній зоні ростової печі (рисунок 1.5) і вмикають нагрів.

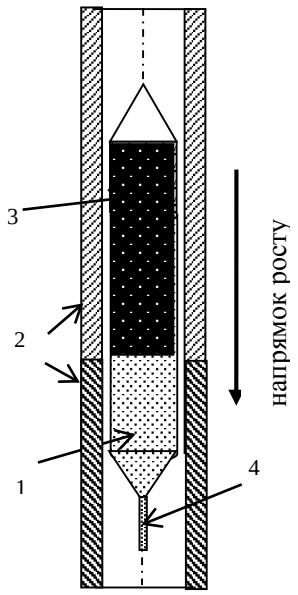

Рисунок 1.5. Схема устаткування для вирощування монокристалів методом Бриджмена-Стокбаргеру. Цифрами означені: 1 – монокристал, 2 – нагрівач, 3 – розплав, 4 – зародок.

Температуру верхньої зони встановлюють на рівні 230ºС, а нижньої на рівні 115ºС. Коли розплав торкається зародку ампулу починають знижувати із швидкістю 1,25 мм/год. За монокристалом при вирощуванні необхідно слідкувати за появою дефектів. У разі появи дефектів, дефектну частину плавлять, піднімаючи ампулу до бездефектної зони. Коли ампула повністю знаходиться у нижній зоні її зупиняють і починають відпал. Для цього знижують температуру верхньої частини до температури нижньої зі швидкістю 5ºС/год., а потім і у верхній і у нижній частині печі знижують температуру до кімнатної зі швидкістю 1ºС/год. Після відпалу ампулу розбивають, а вирощений кристал (рисунок 1.6) віддають на обробку [10].

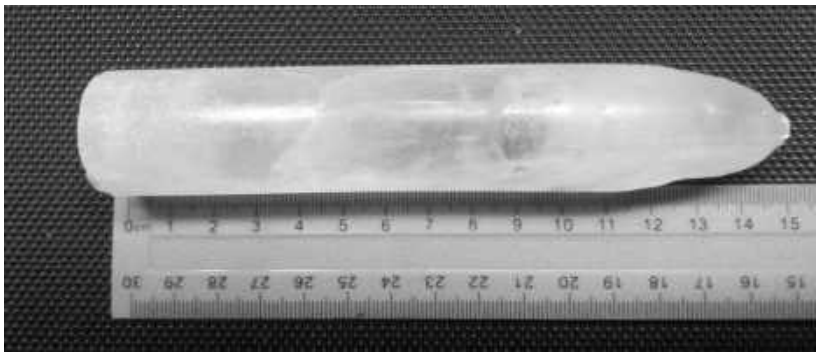

Рисунок 1.6. Вирощений, але ще не оброблений, кристал *n*-терфенілу.

1.2.2. Підготовка ампул, очищення сировини та вирощування монокристалів стильбену

Із скла «Пірекс» виготовляються ампули для очищення сировини стильбену (див рисунок 1.1) і для вирощування монокристалів (див. рисунок 1.2).

Перед заповненням ампули ретельно миються і висушуються. Потім ампула для очищення сировини заповнюється і розміщується у верхній частині ростової печі де сировина плавиться. Після того як ампула охолоне її заповнюють повністю. Із заповненої ампули на стенді підготовки ампул відкачують повітря і заповнюють аргоном. Операцію повторюють три-чотири рази. При останньому заповнені аргоном залишають невеликий вакуум (0,4 від

атмосферного тиску). Після цього ампулу відпаюють. Відпаяну ампулу розміщують у верхній частині ростової печі розплавляють увесь об'єм, а далі сировина кристалізується переміщуючись уверх зі швидкістю 10 мм/год. Після того як уся сировина кристалізується ампулу охолоджують і розбивають, а верхні 2/3 частини від об'єму ампули відбирають для заповнення ростової ампули. Перед заповненням ростової ампули у нижній частині ампули встановлюють зародок з орієнтованого монокристалу. Підготовка ростової ампули подібна до підготовки ампули для очищення. Підготовлену ампулу розміщують у верхній зоні ростової печі (див. рисунок. 1.5) і вмикають нагрів. Температуру верхньої зони встановлюють на рівні 150ºС, а нижньої на рівні 75ºС. Коли розплав торкається зародку ампулу починають рухати до низу із швидкістю 1,25 мм/год. Коли ампула повністю вже знаходиться у нижній зоні її зупиняють і починають відпал. Для цього знижують температуру верхньої частини до температури нижньої зі швидкістю 5ºС/год., а потім і у верхній і у нижній частині печі знижують температуру до кімнатної зі швидкістю 1ºС/год. Після відпалу ампулу розбивають, а вирощений кристал передається на обробку.

1.2.3. Установка для очищення сировини та вирощування органічних монокристалів.

Для вирощування монокристалів використовували комерційно доступну сировину *n*-терфенілу, або синтезовану нами сировину стильбену, яку очищували методом зонної плавки. Як показують незалежні дослідження монокристали стильбену, які отримані з української сировини виробництва ІСМА НАН України, мають в 2-3 рази більші значення світлового виходу, ніж монокристали стильбену, які отримані з комерційно доступного сировини фірми ProChem Inc [9].

Очищення сировини та вирощування органічних монокристалів *n*-терфенілу та стильбену було проведено на установці нашої розробки, яку представлено на рисунку 1.7.

Рисунок 1.7. Установка для очищення сировини та вирощування органічних монокристалів.

Особливістю установки є можливість заміни редукторів СД-54, які відрізняються тим, що мають різне число обертів. Заміна редукторів потрібна для зміни процесу очищення на процес вирощування й навпаки. Тоді як, у загальному випадку, для зонного очищення сировини, де швидкість підйому ампули складає 5 мм/год необхідно мати один двигун, тоді як для вирощування монокристалів, де швидкість підйому ампули 1,25 мм/год треба мати інший двигун.

При вирощуванні органічних монокристалів методом Бріджмена-Стокбаргера дуже важливо утримувати постійну температуру і постійний рівень фронту кристалізації. Для цього використовувалися пропорційно-інтегрально-диференціальні (ПІД) вимірювачі-регулятори температури «ОВЕН» ТРМ 202, напівпровідникові регулятори потужності RM1E23AA25, термоперетворювачі ХК, джерело безперебійного живлення SinPro 1200-S510 1200Вт 24В та батарея акумуляторна (12 В, 90 А·час).

Підготовка ампул до очищення сировини та вирощування монокристалів здійснювалася на спеціально обладнаному стенді, представленому на рисунку 1.8. Обладнання складається з одноступінчастого насосу ВМ-461М, вакуумного насосу Wigam 412, балону с аргоном, вакуумметру ВІТ-2 для виміру глибокого вакууму, вакуумметрів для вимірювання вакууму у діапазоні від 0 до 0,1 МПа, ротаметру та затискачів для вакуумних шлангів.

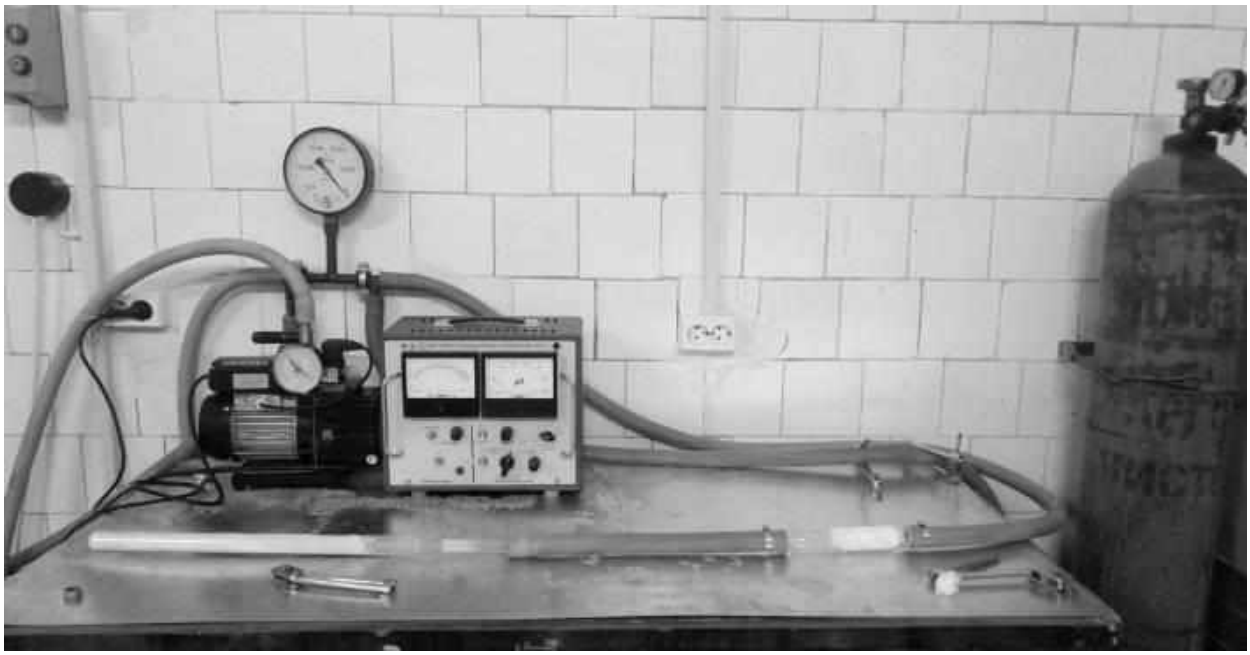

Рисунок 1.8. Стенд для підготовки ампул.

Обробка кристалу складається з проточки кристалу, прорізки проточеного кристалу, шліфування та полірування. Після виконання цих операцій отримуємо монокристали, які зображені на рисунку 1.9.

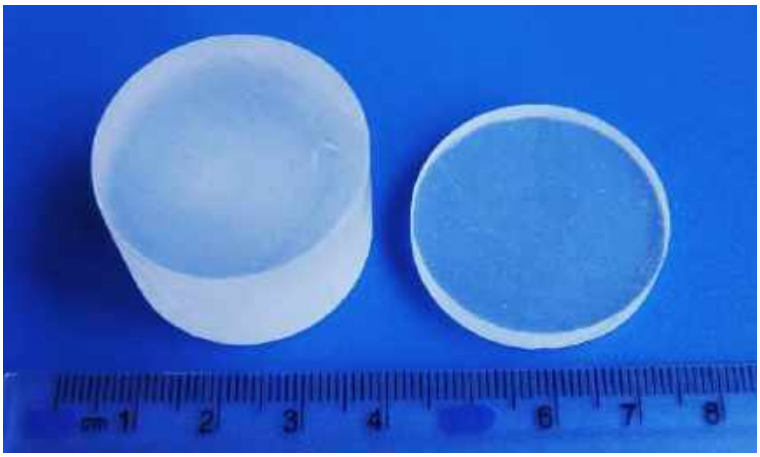

Рисунок 1.9. Зображення монокристалів *n*-терфенілу в ультрафіолетовому світлі.

1.3. Гетероструктуровані сцинтилятори

Гетеростуктуровані сцинтиляційні матеріали мають низьку собівартість в порівнянні з монокристалами, менш крихкі та можуть бути виготовлені у вигляді сцинтиляційних детекторів довільної форми та необмеженого розміру. Вони є перспективними матеріалами для вирішення завдань, де важлива ефективність реєстрації заряджених частинок, коли необхідно розділяти сигнали від різних видів іонізуючих випромінювань.

1.3.1. Отримання кристалічних гранул n-терфенілу та стильбену

Класичним шляхом отримання кристалічних гранул для виготовлення композиційних сцинтиляторів є метод механічного дроблення монокристалу. З іншого боку, як було доведено нами у патенті [11], вихідний матеріал для пресування у вигляді гранул стильбену, очищення якого проводилася методом зонного плавлення, є більш ефективним як з точки зору отримання гетероструктурованих матеріалів з високими значеннями світлового виходу,

так й з точки зору низької собівартості виготовлення. Якщо для стильбену такий спосіб дійсно ефективний, то недоліком методу зонної плавки для *n*-терфенілу є те, що злиток, який було отримано, навіть після трьох проходжень через чотири зони, є недостатньо прозорим (див. рисунок 1.10). Окрім того, з такого злитку не може бути отримано багато гранул великого розміру (більше 2 мм), що не є перепоною для проєкту, який виконується. Цікавим, ефективним і достатньо простим рішенням є використання удосконаленого методу зонної плавки злитку. Це нове рішення дозволило нам отримувати майже монокристалічний злиток (див. рисунок. 1.10) із великою частиною гранул великого розміру.

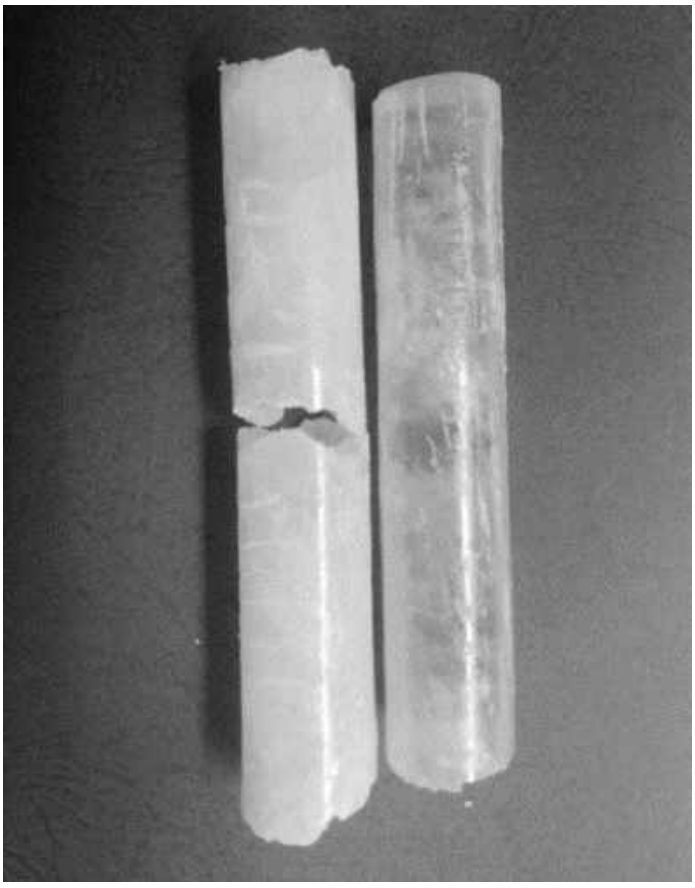

Рисунок 1.10. Злитки *n*-терфенілу, які були очищені методом зонної плавки. Ліворуч: злиток, який отриманий звичайним шляхом, праворуч: з використанням удосконаленого методу зонної плавки.

Гранули поділялися по фракціям шляхом просіювання їх через калібровані сита. У використаний нами набір каліброваних лабораторних сит (СЛМ-120 [12]) входили сита з розмірами отворів: 0,04; 0,06; 0,063; 0,1; 0,3; 0,5; 1,0; 1,2; 1,4; 1,8; 2,0; 2,2; 2,5; 3,0 мм. Спочатку бралося сито з отворами найбільшого розміру L_i. Гранули великого розміру, які не проходили через отвори цього сита відбиралися, і повторно дробилися. Ті гранули, що пройшли крізь це сито потім просівали через сито з отворами меншого діаметра $L_{i\text{-}1}$. У результаті, залишалися гранули, діаметр яких був менше L_i, але більше $L_{i\text{-}1}$. Далі процес повторювався для сит із все меншими і меншими розмірами отворів. Для опису обраної фракції зерен далі будемо використовувати оціночну величину:

$$L_{\text{сер}} = (L_i + L_{i-1})/2 \quad , \tag{1.1}$$

Величина $L_{сер}$ (1.1) дає значення середнього розміру гранул, за умови, що гранули різного розміру мають однакову вірогідність знаходження у вибраної фракції. Це, безумовно, наближення, що дає грубу оцінку реальної ситуації. Воно справедливо в межах розв’язуваної задачі, коли розглядаються значення параметрів люмінесцентного відгуку (при оптичному, або радіаційному збудженні) в залежності від якісної зміни (збільшення або зменшення) розмірів гранул.

У разі отримання гранул з попередньо вирощених монокристалів такі монокристали стильбену і *n*-терфенілу розміщували у фторопластову ступку, в яку додають рідкий азот. Отримані після дроблення гранули просіювали через каліброване сито з розміром отворів 3,0 мм. Залишки гранул більшого розміру і частини монокристала, що не були зруйновані, повторно піддавалися дробленню. Процес повторювався і тривав до тих пір, поки всі гранули не проходили крізь сито. У разі дроблення монокристала стильбену процес повторювався тричі. При першому дробленні через сито пройшло більше половини дробленого матеріалу, при другому розподілі через сито пройшло

теж більше половини матеріалу, що залишився на ситі. При дробленні монокристалу *n*-терфенілу процес повторювався 8 разів, і кожного разу крізь сито проходило лише від 10 до 15% дробленого матеріалу. Для виготовлення зразків, які містили гранули розмірів менших за 3мм, отримані на попередньому етапі гранули послідовно просіювались через калібровані сита, які мали розміри отворів менших за 3,0 мм.

1.3.2. Технологічні особливості створення полікристалів

У зібрану матрицю рівномірно закладаються гранули, на які потім зверху вставлявся пуансон (рисунок 1.11 (1) – рисунок 1.11 (3)). Зібрана таким чином прес-форма закріплювалася в фіксуючому контейнері (рисунок 1.11 (4)). Фіксуючий контейнер далі розміщувався у нагрівачі (рисунок 1.11 (5)), і розміщувався під пресом (рисунок 1.11 (6)). Насипний об’єм матеріалу, який містився в прес-форму, в 1,7–2 рази перевищував обсяг отриманого полікристалу.

Рисунок 1.11. Прес-форма для створення полікристалічних сцинтиляторів.

Заданий тиск на пуансон прес-форми прикладалася при досягненні необхідної температури пресування. Далі при цих параметрах, зразок витримувався відповідно до часу температурної витримки. Температура пресування для стильбену 100ºС, а для *n*-терфенілу 165ºС. Пресування при інших температурах призводить до погіршення прозорості. Зниження

температури пресування призводить до гіршого спікання, а підвищення до більшої сублімації. Після закінчення заданого часу тиск знижувався протягом 10–15 хвилин до нульового значення. Зниження до кімнатної температури проводилося протягом 120–150 хвилин. Зразки з прес-форми, що охолонула акуратно виймалась за допомоги пресу [13, 14]. Таким чином, при спіканні гранул було отримано нові матеріали органічні молекулярні полікристали гарячого пресування (Ван-дер-Ваальсову кераміку) [2, 10, 14].

1.3.3. Технологічні особливості створення композиційних сцинтиляторів

Композиційні сцинтилятори виготовлялись із кристалічних гранул, які отримували шляхом подрібнення під рідким азотом органічних монокристалів, або полікристалічного злитку (булі), який формувався в процесі очищення вихідної сировини зоною плавкою (див. підрозділ 1.3.1). За допомогою набору каліброваних сит кристалічні гранули розділяли на фракції з різним розміром. Вибрана фракція гранул вводилась в полісилоксанову еластомерну матрицю [15]. Отримана маса вводилась у формоутворюючий контейнер таким чином, щоб забезпечити щільну упаковку кристалічних гранул в матеріалі композиційного сцинтилятору [3, 4]. Вміст гранул в сцинтилятор складав 70-80%.

В зв’язку із тим, що дослідження будуть проводитися з використанням альфа-частинок поверхня композиційного сцинтилятора, тобто зовнішній шар гранул, має бути не покрита шаром полісилоксанового еластомеру. Це досягалось шляхом нанесення додаткового шару сухих гранул. Зразок залишали при температурі 60˚С на 24 години. По закінченні процесу полімеризації композиційний сцинтилятор витягували з формоутворюючого контейнера [5]. Для досліджень було виготовлено серію композиційних сцинтиляторів на основі стильбену та *n*-терфенілу діаметром 20 мм і висотою 5 мм. Була виготовлена серія зразків, розмір гранул в яких варіювався в

діапазонах: 0,1 – 0,3 мм, 0,3–0,5 мм, 0,5–1,0 мм, 1,0–1,5 мм, 1,5–2,0 мм, 2,0–2,5 мм.

Для отримання та подальшого дослідження одношарових композиційних сцинтиляторів на основі кристалічних гранул стильбену та *n*-терфенілу використовувалися аналогічні фракції гранул із вищенаведеними розмірами та додаткові зразки із фракціями гранул: 0,06 – 0,1 мм, < 0,04 мм та < 0,06 мм (див. рисунок 1.12). Розмір зразків становив 15×15 мм. Одношарові композиційні сцинтилятори виготовлялись наступним чином. Гранули вибраних фракцій вводилися в полісилоксановий еластомер, який не є люмінесцентним матеріалом. Суміш наносили на радіаційно-стійку плівку та залишали до повної полімеризації середовища.

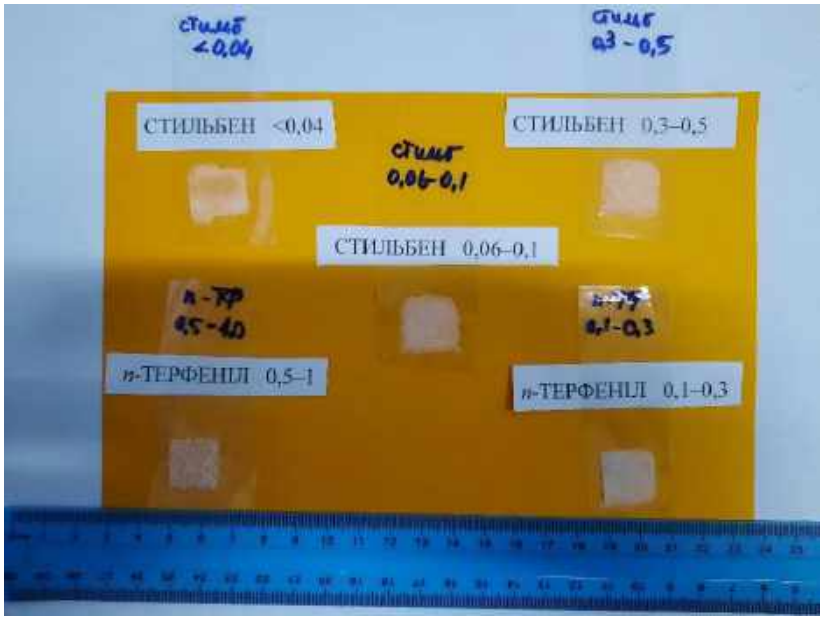

Рисунок 1.12. Зразки одношарових композиційних сцинтиляторів на основі кристалічних гранул стильбену та *n*-терфенілу.

Композиційні сцинтиляторі на відміну від монокристалів і пластмас не є суцільними середовищами. Вони більш близькі до м'якої матерії Як видно із опису технології їх отримання, вони не мають технологічних обмежень на площу вхідного вікна. Вони дешевші за монокристали, бо не потребують

найбільш дорогої стадії отримання монокристала - його виростання, а основне джерело втрат монокристалічного матеріалу - його механічна обробка, до того ж, відсутня.

РОЗДІЛ 2
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Згідно календарного плану виконання робіт були відпрацьовані експериментальні методи дослідження нових типів органічних гетерогенних сцинтиляторів. При підборі методів досліджень враховувалося те, що основними сцинтиляційними параметрами, які визначають властивості органічних сцинтиляційних матеріалів, є їх світловий вихід, оптичне пропускання, роздільна здатність та часові параметри форми сцинтиляційного імпульсу. Відпрацьовано експериментальні методи дослідження спектрів поглинання, миттєвої і затриманої флуоресценції, а також фосфоресценції органічних монокристалічних та гетерогенних сцинтиляторів при кімнатній температурі та 77 K.

2.1. Метод вимірювання світлового виходу сцинтиляторів

Кількість світла, яку випромінює сцинтилятор, характеризують величиною світлового виходу, тобто відношенням числа фотонів, що виникають у сцинтиляторі, до енергії, яку втрачає в ньому іонізуюче випромінювання. Сутність методу полягає у вимірі електричного сигналу на виході фотоприймача, який реєструє люмінесценцію сцинтилятору. На виході фотоприймача відбувається підсумовування електричних сигналів, обумовлених фотонами сцинтиляційного імпульсу, які в ньому виникають. Величина цього накопиченого сигналу пропорційна амплітуді сцинтиляційного імпульсу [2, 18, 19]. Для органічних сцинтиляторів як фотоприймач краще використовувати фотоелектронні помножувачі [2]. Ми використовували фотоелектронний помножувач 9208A фірми Electron Tubes Ltd., у якого, відповідно паспортних даним, темновий струм становить рекордно мале значення $6{,}8\times10^{-11}$ А при анодній чутливості 50 А/Лм [18, 19]. Вихідний ланцюг фотоелектронного помножувача мав час формування електричного сигналу τ_{an} = 2 мкс.

Найчастіше величину світлового виходу визначають по спектру амплітуд сцинтиляцій. Амплітудний розподіл імпульсів сцинтилятора вимірювали за допомогою АЦП (амплітудно-цифрового перетворювача) із накопиченням і обробкою отриманої інформації у пам'яті персонального комп'ютера. Відносне значення величини світлового сигналу при такій методиці вимірів може бути визначене як:

$$LY_{відн} = \left(J \middle/ J_{ет} \right) \cdot 100\% \qquad (2.1)$$

де, J – значення амплітуди максимуму спектра досліджуваного сцинтилятора, $J_{ет}$ – значення амплітуди максимуму спектра еталонного сцинтилятора.

Знаючи значення технічного світлового виходу еталонних сцинтиляторів у фотонах на 1 МеВ, можна одержати відповідні значення технічного світлового виходу досліджуваних зразків. Погрішність визначення світлового виходу для наведеної методики вимірів не перевищує 5% [2, 20]. Для визначання світлового виходу використовується джерело фотонів гамма-випромінювання ^{137}Cs (E_γ = 0,662 МеВ). Перевірка лінійності шкали аналізатору проводилася по комптон-краям розподілу амплітуд сцинтиляцій, які збуджувались радіонуклідними джерелами фотонів гамма-випромінювання (^{22}Na, ^{60}Co, ^{137}Cs, ^{152}Eu), показала, що в межах ±5% енергетична шкала є лінійною. Як еталонний сцинтилятор використовували монокристал того ж самого розміру та хімічного складу, як і зразки гетероструктурованих сцинтиляторів, які досліджувалися.

Той факт, що вивчалися одношарові зразки композиційних сцинтиляторів, робить обґрунтованим використання джерел короткопробіжного іонізуючого випромінювання Альфа-спектри вимірювалися з використанням джерела альфа-частинок ^{239}Pu (див. рисунок 2.1).

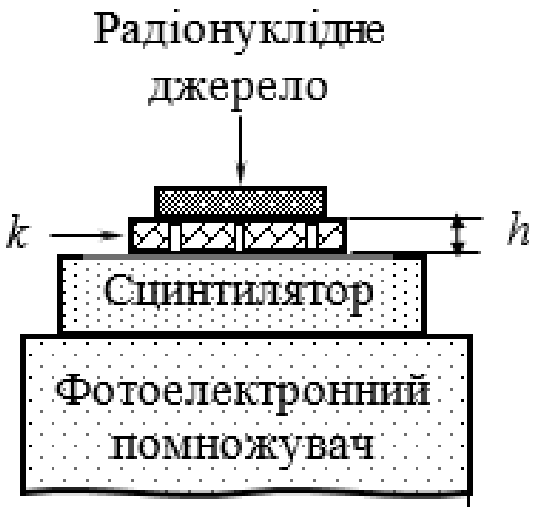

Рисунок 2.1. Схема вимірювань світлового виходу сцинтиляторів при опроміненні їх альфа-частинками.

Нами було використано радіонуклідне джерело альфа-випромінювання, яке містять ізотопи $^{239}_{94}$Pu із граничною енергією альфа-частинок 5,15 МеВ. Для таких частинок питомі енергетичні втрати dE/dx ~ 10^3МеВ/см, а пробіг близько 25 мкм. Джерело, яке використовувалось, випромінювало ~ 2×10^3 частинок/с (2π- геометрія). При опромінюванні альфа-частинками необхідно використовувати коліматор. Дійсно, сцинтиляційні сигнали від альфа-частинок, що мають однакову енергію, але падають під різними кутами на поверхню сцинтилятору, відрізняються. Чим більший кут падіння, тим меншу порцію своєї енергії частинка передає сцинтилятору. Це призводить до розмивання сумарного сигналу, коли опромінювання відбувається у 2π-геометрії.

Для покращання енергетичного розділення сигналів у спектрі амплітуд сцинтиляцій треба, щоб частинки різних енергій падали на зразок під однаковими, краще малими кутами. Мається на увазі, що альфа-частинки налітають у напрямку, який перпендикулярний до площини вхідного вікна сцинтилятору [2]. Для цього ми використовували у якості коліматору k фторопластове кільце товщино h = 2 мм із максимально можливим числом

циліндричних отворів діаметром $d < h$. У нашому випадку d = 0,5 мм. На рисунку 2.1 умовно показано три отвори, що колімують опромінення.

2.2. Метод вимірювання оптичного пропускання зразків

Коефіцієнт пропускання визначають як величину, що дорівнює відношенню потоку випромінювання Φ, яке пройшло крізь речовину, до потоку випромінювання Φ_0, яке впало на його поверхню:

$$T = \left(\frac{\Phi}{\Phi_0} \right) \times 100\% \qquad (2.2)$$

Оптичне пропускання зразків органічних гетерогенних сцинтиляторів вимірювалося на спектрофотометрі Shimadzu UV-2450. Абсолютна похибка визначення довжини хвилі складала 0,4 нм, а вимірювання спектральних коефіцієнтів пропускання – 0,6 % [21].

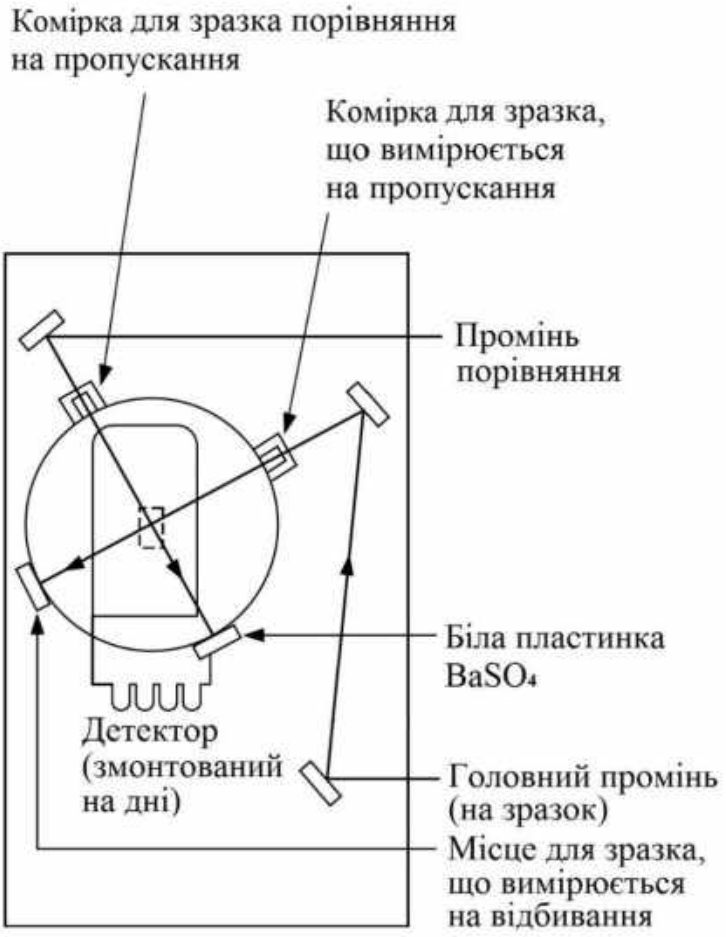

Рисунок 2.2. Оптична схема інтегруючої сфери.

Вимірювання проводились із використанням інтегруючої сфери, де більша частина розсіяного світла збирається назад у промінь, який падав на фотоелектронний помножувач спектрофотометру. Оптичну схема інтегруючої сфери представлено на рисунку 2.2. Спектрофотометр має два канали. На початку роботи проводилося калібрування приладу, тобто прописувалася лінія 100% пропускання, коли один і той же сигнал проходив через обидва канали. Потім на шляху одного з променів встановлювали зразок. Зразок за допомогою затискувача щільно притулявся до зовнішньої поверхні сфери, оскільки від цього залежала точність вимірювань. Вимірювання проводили відносно повітря (один канал залишався незаповненим). Ця величина у формулі (2.2) приймалася за $\Phi_0 = 100\%$.

2.3. Метод ідентифікації іонізуючого випромінювання за формою сцинтиляційного імпульсу

Проведення точних ядерно-фізичних досліджень є неможливим без використання методів ідентифікації іонізуючого випромінювання, тобто селективної реєстрації іонізуючих випромінювань із різними питомими енергетичними втратами *dE/dx* [2, 16, 19, 22]. Таких методів існує декілька. Для проведення досліджень ми обрали найбільш точній із них – метод роздільної реєстрації частинок, який полягає в безпосередньому порівнянні зарядів у повільному та швидкому компонентах сцинтиляційного імпульсу, узятих із різними статистичними вагами [2].

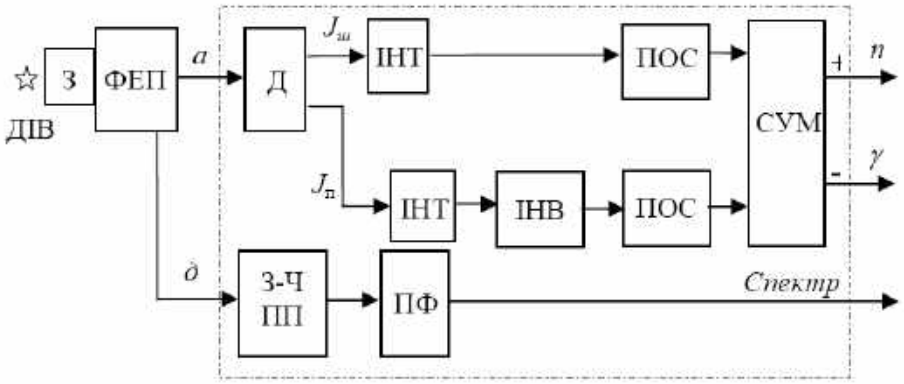

Рисунок 2.3. Блок-схема установки для роздільної реєстрації іонізуючого випромінювання з різними питомими енергетичними втратами *dE/dx*.

ДІВ – джерело іонізуючого випромінювання; З – зразок, ФЕП – фотоелектронний помножувач 9272B (Electron Tubes Ltd.) [18]; *a* – анодний вихід ФЕП; *∂* – вихід з передостаннього диноду ФЄП; Д – дискримінатор; ІНТ – інтегратор; ІНВ – інвертор; ПОС – амплітудні посилювачі; СУМ – суматор; З-Ч ПП – зарядо-чуттєвий попередній посилювач; ПФ – посилювач-формувач; *n* – вихід управління нейтронним (альфа) спектром; *γ* – вихід управління гамма-спектром (або спектром, який отримано при електронному збудженні); *спектр* – вихідний сигнал для спектрального аналізу.

На рисунку 2.3 представлена блок-схема установки, що реалізує цей метод. Сигнал з анодного виходу фотоелектронного помножувача надходить на електронну схему, що розділяє заряд в інтервалі часів після збудження від 0 до 50 нс та від 50 нс до 2 мкс, тобто час швидкого й повільного сигналів, відповідно. Заряд, який інтегровано в інтервалі часу від 0 до 50 нс, це величина $J_ш$, а заряд, який інтегровано в інтервалі часу від 50 нс до 2 мкс, а потім інвертовано (тобто полярність його стає позитивною), це є величина J_n. Ці сигнали різної полярності, які пропорційні $J_ш$ та J_n, додаються один до одного у такій пропорції, що реєстрація сцинтиляційних імпульсів при збудженні

нейтронами, або альфа – частинками (коли інтенсивність J_n значна) приводить до формування сигналу позитивної полярності на виході схеми суматору, а реєстрація фотонів гамма-випромінювання (коли інтенсивність J_n є малою величиною) – негативної полярності. Виникнення цифрового сигналу на роздільних «нейтронному» або «гамма» виходах визначається полярністю сумарного ($J_ш$ та J_n) сигналу. Зарядо-чуттєвий і формуючий амплітудний посилювачі формують сигнал із передостаннього диноду фотоелектронного помножувача для амплітудного аналізу.

2.4. Однофотонний метод (із кореляцією у часі) дослідження повільного компоненту імпульсу радіолюмінесценції

Для вимірювань кінетичних параметрів імпульсу радіолюмінесценції найбільш точним є метод рахування окремих фотонів світла з кореляцією в часі [2]. Головні принципи застосування методики рахування окремих фотонів світла для прецизійного дослідження кінетики сцинтиляційного спалаху, а також шляхи покращення часового розділення установки детально розглянуті в [6].

Зазвичай три основних модифікації оптичної частини застосовуються для: а) дослідження кінетики сповільненої радіолюмінесценції органічних детекторів та форми сцинтиляційного імпульсу більшості неорганічних детекторів (із прив’язкою до фронту наростання сцинтиляційного імпульсу зразка); б) дослідження кінетики миттєвої радіолюмінесценції органічних де текторів (із прив’язкою до випромінювання спеціального черенковського радіатору); в) дослідження кінетики радіолюмінесценції тонких зразків органічних детекторів.

Дослідження повільного компоненту сцинтиляційного імпульсу не потрібує рекордного часового розділення. На перший план виходить забезпечення оптимального співвідношення сигнал/шум у повільному компоненті, де статистична густина ймовірності набору корисних подій є достатньо низькою. У такій ситуації прив’язку в стартовому каналі

здійснюють за моментом появи фотонів сцинтиляційного імпульсу в самому зразку, що досліджується. Іншими словами, виграючи в інтенсивності сигналу прив'язки, нехтують тим, що точність прив'язки визначається часом розмиття фронту наростання сцинтиляційного імпульсу, який все ще є малим у порівнянні з вимірюваним параметром, тобто характерним часом спаду повільного компоненту. Тому досліджуваний зразок З знаходиться в оптичному контакті з вхідним вікном «стартового» ф.е.п. (див. рисунок 2.4).

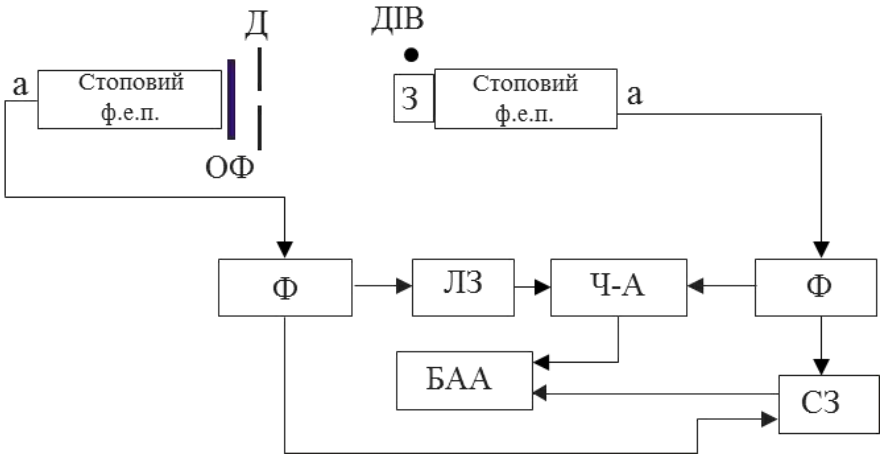

Рисунок 2.4 [2]. Блок-схема установки для вимірів параметрів кінетики затриманої радіолюмінесценції органічних сцинтиляторів.

З – експериментальний зразок; ДІВ – джерело іонізуючого випромінювання; Д – діафрагма; ОФ – оптичний фільтр; а – вивід аноду ф.е.п.; Ф – формувач із компенсацією амплітудного розкиду; Ч-А – часово-амплітудний конвертор; БАА – багатоканальний амплітудний аналізатор; СЗ – схема збігу; ЛЗ – лінія затримки, яка компенсує часову затримку «стартового» імпульсу.

Для більшості органічних сцинтиляторів форма повільного компоненту імпульсу радіолюмінесценції перестає маскуватися швидким компонентом для часу $t > 50$ нс після збудження [2, 16]. Розрахункова інтенсивність повільного компоненту сцинтиляційного імпульсу для $t < 50$ нс на кілька порядків величини менша, ніж інтенсивність швидкого компоненту [2]. Тому

дослідження повільного компоненту для часів, близьких до моменту збудження речовини первинною частинкою, буде проводитися з похибкою, яка у багато разів перевищує величину, що досліджується. Таким чином, використання кінетики радіолюмінесценції як методу вивчення первинного розміну енергії іонізуючого випромінювання (тобто для t <50 нс) не є доцільним через фізичні обмеження, що спричинюються самою природою сцинтиляційного процесу.

Під час дослідження форми повільного компоненту сцинтиляційного імпульсу будемо вибирати такий режим роботи установки (рисунок 2.4), який за допомогою БАА забезпечував можливість реєстрації фотонів, які виникають у часовому діапазоні t від 0 до 2 мкс після моменту збудження. Даний режим відповідає часу формування електричного сигналу вихідного ланцюга ф.е.п. τ_{an} при вимірюванні величини світлового виходу сцинтиляторів (див. підрозділ 2.1). Такий підхід дозволяє коректно вивчити відносний внесок повільного компоненту сцинтиляційного імпульсу в сумарне число фотонів, що виникають у сцинтиляторі.

2.5. Методи дослідження спектрів поглинання, миттєвої і затриманої флуоресценції, а також фосфоресценції органічних сцинтиляторів при кімнатній температурі та 77 K

Оптичне поглинання у видимому та ультрафіолетовому діапазоні досліджувалося на спектрофотометрі Specord UV VIS, діапазон 50000–13000 $см^{-1}$ (200–770 нм). Діапазон по оптичній густині 0–1,4. Швидкість розгортки по довжинам хвиль вибиралась відповідно до форми спектру поглинання, для того щоб спектр не спотворювався за рахунок інертності реєструючої частини.

Використовувалися стандартні заводські кварцові 2-х сторонні кювети з полірованими оптичними вікнами для проходження світлового пучка. Оптичний шлях 10,0 мм. Об’єм кювети 3,5 мл, що відповідає наявним об’ємам зразків і дозволяє робити виміри безпосередньо.

Люмінесценція (як флуоресценції так і фосфоресценція та затримана флуоресценції) досліджувалися на спектрофлуориметрі Cary Eclipse (Varian, Austria), який дозволяє вимірювати спектри флуоресценції та фосфоресценції, та їх збудження в спектральному діапазоні 200–900 нм.

Відпрацювання методів вимірювань проводилася на рідких зразках, де розчинилися гранули досліджуваних сцинтиляційних матеріалів. При дослідженні люмінесценції при 300 K рідкий зразок (розчин органічного люмінофора) поміщувався в стандартну 4-х сторонню кварцову кювету для флуорометрії. Збуджуючий пучок світла та система реєстрації були сфокусовані на геометричний центр кювети. Щілини: на збудження – 5 нм, на випромінювання – 5 нм. Контрольні виміри при щілинах 2,5 та 10 нм показали що ширини щілин 5 нм є достатніми для отримання неспотвореного спектра. Швидкість сканування «medium» яка забезпечує прийнятний баланс між швидкістю роботи та зашумленістю спектрів. При дослідженні твердотільних зразків вони мають поміщатися на місце кювети.

Чутливість приладу керувалась напругою на фотоелектроному помножувачі (надалі ФЕП). При вимірюванні флюоресценції використовувався режим «LOW» (мала чутливість), а при вимірах фосфоресценції і затриманої флюоресценції – «HIGH» (висока чутливість), що теж спричинено інтенсивністю випромінювання зразка та необхідністю витримувати сигнал в межах діапазону чутливості приладу. Відсікаючи фільтри на збудження та випромінювання були встановлені в режим AUTO.

Для вимірювання люмінесценції при 77 K зразок в замороженому вигляді встановлювався в азотний кріостат Optistat DN (Oxford Instruments). Температура теплообмінника безперервно контролювалася каліброваним платиновим датчиком опору.

Для вимірювання флуоресценції прилад вмикався в режим виміру флюоресценції, для вимірювання фосфоресценції прилад переводився в режим вимірювання фосфоресценції, для якого можна було вимірювати люмінесценцію із затримкою у часі по відношенню до збудження. В якості

джерела світла в приладі використовується потужна імпульсна ксенонова лампа середнього тиску. Нерівномірність спектру випромінювання лампи, так само як і крива пропускання монохроматорів, враховуються автоматично за рахунок двох ідентичних каналів прийому сигналу.

Окремо слід зазначити що розчинник, у якому були приготовлені зразки (толуол) має температуру замерзання –95^{o}C, що додало деяких складнощів при охолодженні і подальшому замороженні зразку, проте зразки були акуратно заморожені без тріщин і снігу. Тому виміри флуоресценції та фосфоресценції при 77 К характеризуються досить помірним рівнем розсіяного світла.

РОЗДІЛ 3
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

При проведенні експериментальних досліджень ми використовували та порівнювали два види збудження:

1) Збудження світлом, коли органічні зразки опромінювались світлом в червоній області спектра (в області поглинання молекулярних триплетних екситонів), а сигнал реєструвався в синій області спектру, тобто в області флуоресценції зразку. У такій ситуації можлива лише реєстрація світла, що виникає в результаті злиття триплетних екситонів і утворення високо збудженого стану із подвійною енергією триплетного стану. Нагадаємо, що саме це світіння відповідальне за роздільну здатність органічного сцинтилятора.

2) Була також вивчена ситуація, коли збудження відбувалося іонізуючим випромінюванням. У цьому випадку виникає як швидкий, так і повільний компоненти сцинтиляційного імпульсу. Здебільшого реєструється швидкий компонент (миттєва флуоресценція) тому, що його інтенсивність на порядок величини (а в ряді випадків на порядки) перевищує інтенсивність повільного компоненту, тобто затриманої флуоресценції. Це обумовлено сильними квантово-механічними заборонами на переходи з різною мультиплетністю. Так для переходів між синглетними і триплетними станами така заборона по порядку величини складає 10^{-6} [2].

Важливо, що при збудженні іонізуючим випромінюванням затримана флуоресценція маскується швидким компонентом світіння. При збудженні через триплет-триплетну анігіляцію ми бачимо тільки затриману люмінесценцію. Тому, результати, одержані при першому та другому виді збудження, можуть істотно відрізнятися.

Вимірювання проводилися для полікристалічних та композиційних сцинтиляторів, що містять гранули різних розмірів, а також для монокристалічних зразків. Ми досліджували гетеростуктуровані

сцинтилятори, що містять монокристалічні гранули стильбену, не активованого *n*-терфенілу і *n*-терфенілу, який містив 0,1 мас.% 1,4-діфенілбутадієну-1,3 (ДФБ), а також й відповідні монокристали. Вибрані матеріали є найбільш ефективними для задач розділення випромінювань із різними питомими енергетичними втратами *dE/dx* за формою сцинтиляційного імпульсу.

Досліджувалися як одношарові композиційні сцинтилятори квадратної форми із вхідним вікном розміром 20×20 мм (тобто товщина таких зразків дорівнювала розміру відповідних гранул), так й сцинтилятори циліндричної форми діаметром 30 мм та 5 мм завтовшки (полікристали та композиційні сцинтилятори). Тобто такі зразки складалися з декілька шарів кристалічних гранул).

Головну увагу було зосереджено на дослідженні гетерогенних сцинтиляторів стильбену та *n*- терфенілу із різним розміром кристалічних гранул. Досліджувалися зразки з наступними фракціями гранул *L*: < 0,04; <0,06; 0,06–0,1; 0,1–0,3; 0,3–0,5; 0,5–1,0; 1,0–1,5; 1,5–2,0 та 2,0–2,5 мм. Відомо, що для малих фракцій кристалічних гранул може спостерігатися значне зменшення оптичної прозорості внаслідок збільшення кількості границь кристалічних гранул, через які мають пройти фотони світла, це в свою чергу може призвести до різкого падіння як світлового виходу, так й оптичного пропускання сцинтиляційних матеріалів. Тому вкрай важливо було по-перше дослідити зразки, отримані із фракцій, що містили гранули малих розмірів, для яких дослідження фізичних процесів транспорту та рекомбінації *T*-станів, із подальшою затриманою люмінесценцією *S*-станів, можуть виявитися недоцільними внаслідок низької достовірності, отриманих результатів.

3.1. Світловий вихід зразків композиційних сцинтиляторів стильбену та *n*-терфенілу

Нами проводилися дослідження спектрів сцинтиляцій зразків органічних сцинтиляторів, які збуджувалися альфа-частинками джерела ^{239}Pu.

Як еталон нами використовувався монокристал стильбену діаметром 30 мм та 5 мм завтовшки (технічний світловий вихід якого дорівнює 9,700 фотонів/МеВ за ^{137}Cs) та монокристал *n*-терфенілу діаметром 30 мм та 5 мм завтовшки (технічний світловий вихід дорівнює 9,800 фотонів/МеВ за ^{137}Cs).

На рисунку 3.1 представлені спектри альфа-сцинтиляцій еталонного зразку монокристалу та одношарових композиційних сцинтиляторів стильбену (із вхідним вікном квадратної форми розміром 20×20 мм) із різним розміром гранул *L*.

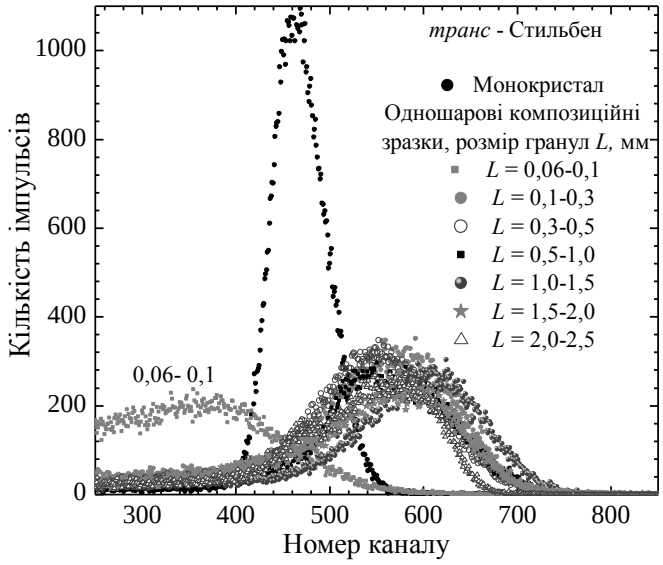

Рисунок 3.1. Спектри альфа-сцинтиляцій еталонного зразку монокристалу та одношарових композиційних сцинтиляторів стильбену (вхідне вікно квадратної форми розміром 20×20 мм) із різним розміром гранул. Еталон стильбену має діаметр 30 мм та 5 мм завтовшки; розмір *L* кристалічних гранул композиційних зразків варіюється.

За результатами вимірів спектрів альфа-сцинтиляцій проведені розрахунки відносного світлового виходу $LY_{відн}$ зразків одношарових композиційних сцинтиляторів стильбену. Результати представлено в таблиці 3.1. За 100% приймався світловий вихід еталонного монокристалу стильбену.

Таблиця 3.1

Відносний світловий вихід $LY_{відн}$ одношарових композиційних сцинтиляторів стильбену

Зразок	Розмір гранул L, мм	$LY_{відн}$, %
Монокристал	–	100,0
Композиційний сцинтилятор	0,06–0,1	76,3
–//–	0,1–0,3	127,8
–//–	0,3–0,5	119,1
–//–	0,5–1,0	118,7
–//–	1,0–1,5	134,8
–//–	1,5–2,0	123,9
–//–	2,0–2,5	121,7

Аналогічні результати досліджень спектрів альфа-сцинтиляцій та $LY_{відн}$ для одношарових композиційних сцинтиляторів *n*-терфенілу представлено на рисунку 3.2 та в таблиці 3.2. В таблиці 3.2 за 100% відповідно приймався світловий вихід еталонного монокристалу *n*-терфенілу.

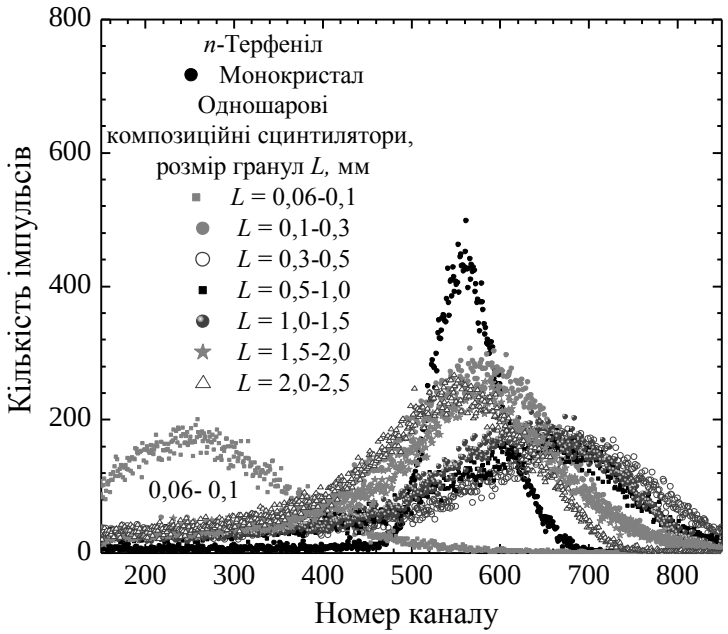

Рисунок 3.2. Спектри альфа-сцинтиляцій еталонного зразку монокристалу та одношарових композиційних сцинтиляторів *n*-терфенілу (вхідне вікно квадратної форми розміром 20×20 мм) із різним розміром гранул *L*. Еталон *n*-терфенілу має діаметр 30 мм та 5 мм завтовшки.

Таблиця 3.2

Відносний світловий вихід $LY_{відн}$ одношарових композиційних сцинтиляторів *n*-терфенілу

Зразок	Розмір Гранул *L*, мм	$LY_{відн}$, %
Монокристал	–	100,0
Композиційний сцинтилятор	0,06–0,1	45,7
–//–	0,1–0,3	100,7
–//–	0,3–0,5	120,6
–//–	0,5–1,0	121,1
–//–	1,0–1,5	113,3
–//–	1,5–2,0	103,8
–//–	2,0–2,5	97,5

Для проведення досліджень також використовувалися композиційні зразки із наступними фракціями гранул: < 0,04; < 0,06. Як еталон використовувалися органічні монокристали відповідного хімічного складу. Збудження проводилося з використанням джерела альфа-частинок ізотопу ^{239}Pu.

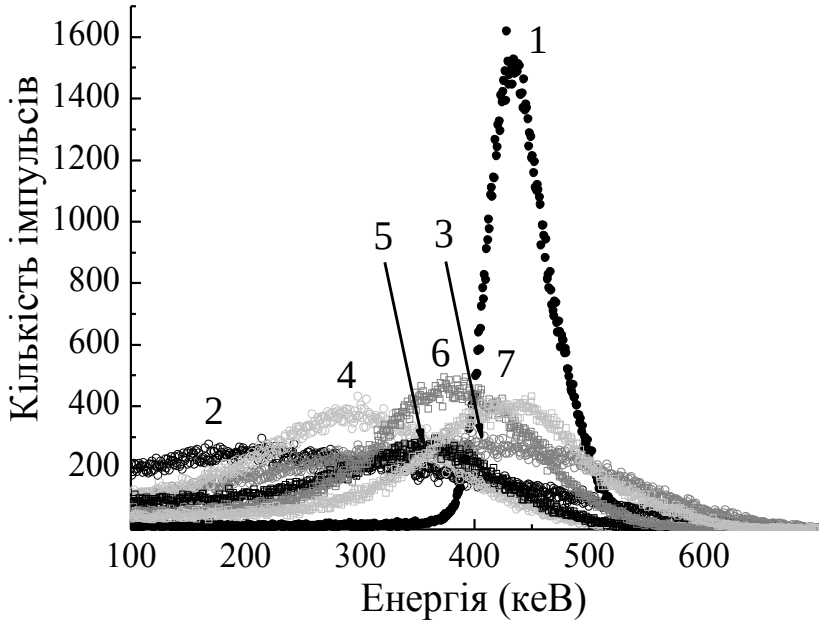

Рисунок 3.3. Спектри амплітуд сцинтиляцій зразків композиційних сцинтиляторів на основі гранул *n*-терфенілу (криві 2-7) та монокристалу *n*-терфенілу (крива 1). Крива 2 – розмір гранул < 0,04 мм, крива 3 – < 0,06 мм, крива 4 – 0,06 – 0,1 мм, крива 5 – 0,1 – 0,3 мм, крива 6 – 0,3 – 0,5 мм, крива 7 – 0,5 – 1,0 мм.

На рисунку 3.3 як приклад показані результати вимірювань спектрів амплітуд сцинтиляцій зразків композиційних одношарових сцинтиляторів на основі чистого *n*-терфенілу. Шкалу абсцис наведено в шкалі енергій фотонів гамма-випромінювання, де калібрування якої проводилося з використанням стандартних радіонуклідних джерел гамма-випромінювання ^{22}Na, ^{60}Co, ^{137}Cs, ^{152}Eu та еталонного монокристала *n*-терфенілу (діаметр ∅ = 30 мм, висота *h* = 5 мм).

Аналогічні спектри амплітуд сцинтиляцій були отримані також для зразків на основі стильбену та *n*-терфенілу, активованого 0,1 мас.% (ДФБ). Розрахунки відносного світлового виходу в залежності від середнього розміру гранули одношарових композиційних сцинтиляторів $L_{сер}$, значення якого було розраховане за формулою (1.1) наведено на рисунку 3.4.

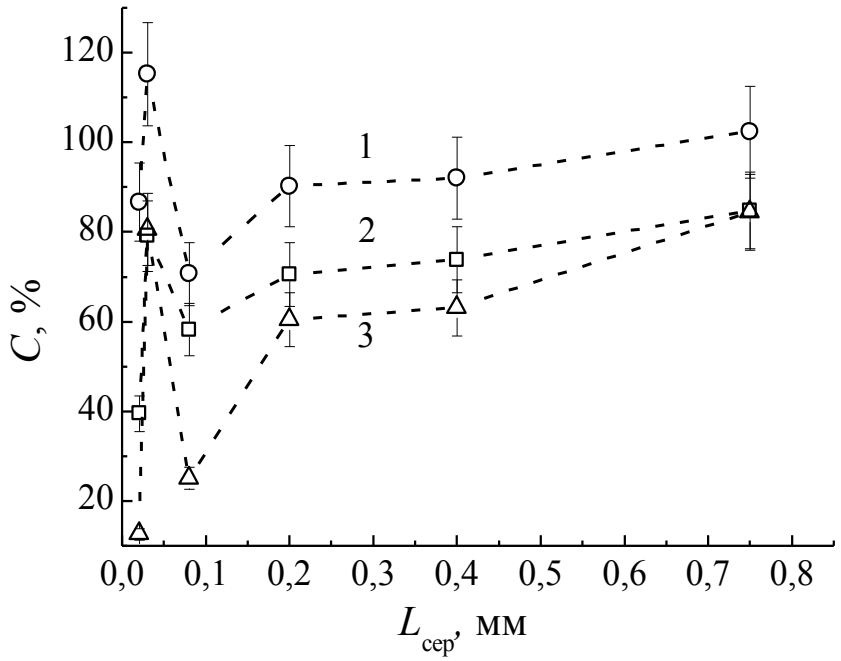

Рисунок 3.4. Відносний технічний світловий вихід *C* (2.1) одношарових композиційних сцинтиляторів на основі стильбену (крива 1), *n*-терфенілу (крива 2) та *n*-терфенілу, активованого 0,1 мас.% ДФБ (крива 3).

За результатами вимірювань спектрів амплітуд сцинтиляцій були проведені розрахунки відносного світлового виходу в залежності від середнього розміру гранули одношарових композиційних сцинтиляторів $L_{сер}$, значення якого було розраховане за формулою (1.1). Розрахунки, які представлено на рисунку 3.4, проведені для усіх типів досліджених зразків. За 100% було обрано технічний світловий вихід відповідного монокристалічного зразку. Фракції гранул наведено у підписі до рисунку 3.3.

При збудженні альфа-частинками сигнал зростав із зростанням розмірів гранул і був максимальний для монокристалів. Те ж саме спостерігалося нами

раніше при збудженні світлом у перший синглетний стан цих матеріалів [8]. При цьому необхідно відзначити, що через сильну електризацію досліджуваних органічних діелектриків, вводити фракції гранул малих розмірів у гель-композицію не вдавалося. Відзначимо, що нам не відомі роботи, де були б отримані композиційні сцинтилятори, що містять фракції гранул досліджуваних органічних діелектриків із середнім розміром гранул 0,06 і меншим. Тому, гранули з розмірами меншими за 0,04 мм і меншими за 0,06 мм наносилися на тонку липку стрічку, яка грала роль підкладки. Це було пов’язано з неможливістю виділення окремих гранул із утвореного наелектризованого згустку при їх введенні в гель-композицію. У гелі гранули таких малих розмірів не розподілялися рівномірно. Спливаючи на поверхню, вони утворювали згусток. Гранули великих розмірів вводилися в полісилоксанову гель-композицію SYLGARD–184 [23], успішно застосовувалася нами раніше [3–5, 7, 8].

Аналіз отриманих результатів досліджень одношарових композиційних сцинтиляторів вказує на те, що зразки з розміром гранул розмірами меншими за 0,04 мм, меншими 0,06 мм та навіть 0,06–0,1 мм мають дуже низький світловий вихід, тому подальше використання сцинтиляторів, які містять гранули розміром L менше ніж 0,1 мм при збудженні іонізуючим випромінюванням не має сенсу. Більші значення $LY_{відн}$ для одношарових композиційних сцинтиляторів з більшими розмірами гранул (більше 0,1 мм) ніж для еталонного монокристалу зумовлено тим, що їх товщина є меншою ніж у відповідних еталонних монокристалів. Така закономірність раніш відмічалась як для тонких зразків стильбену, так і для зразків *n*-терфенілу, що пов'язано зі специфікою збору світла у прозорих зразків (де немає розсіювання і тому перемішування траєкторій пучків світла) і зразків із розсіянням світла [2]. Треба зазначити, що при збудженні світлом, ситуація може суттєво відрізнятися.

Виходячи з вищенаведеного ми провели аналогічні дослідження для зразків композиційних сцинтиляторів стильбену та *n*-терфенілу більшої

товщини (5 мм) починаючи з фракції гранул 0,1–0,3 мм. На рисунку 3.5 продемонстровано спектри амплітуд альфа-сцинтиляцій композиційних сцинтиляторів стильбену з товщиною 5 мм. Результати розрахунків $LY_{відн}$ для стильбену представлено в таблиці. 3.3.

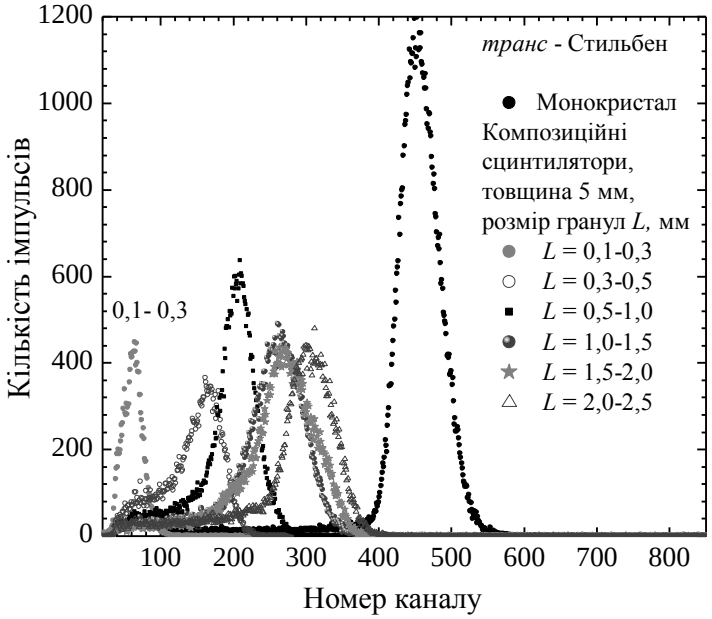

Рисунок 3.5. Спектри альфа-сцинтиляцій еталонного зразку монокристалу стильбену та композиційних сцинтиляторів, які містять гранули стильбену розміром *L*. Товщина зразків 5 мм.

Таблиця 3.3

Відносний світловий вихід $LY_{відн}$ композиційних сцинтиляторів стильбену товщиною 5 мм

Зразок	Розмір гранул *L*, мм	$LY_{відн}$, %
Монокристал	–	100,0
Композиційний сцинтилятор	0,1–0,3	13,3
–//–	0,3–0,5	34,9
–//–	0,5–1,0	45,6
–//–	1,0–1,5	57,1
–//–	1,5–2,0	57,6
–//–	2,0–2,5	68,2

Результати досліджень спектрів альфа-сцинтиляцій та $LY_{відн}$ для композиційних сцинтиляторів *n*-терфенілу товщиною 5 мм представлено на рисунку. 3.6 та в таблиці 3.4.

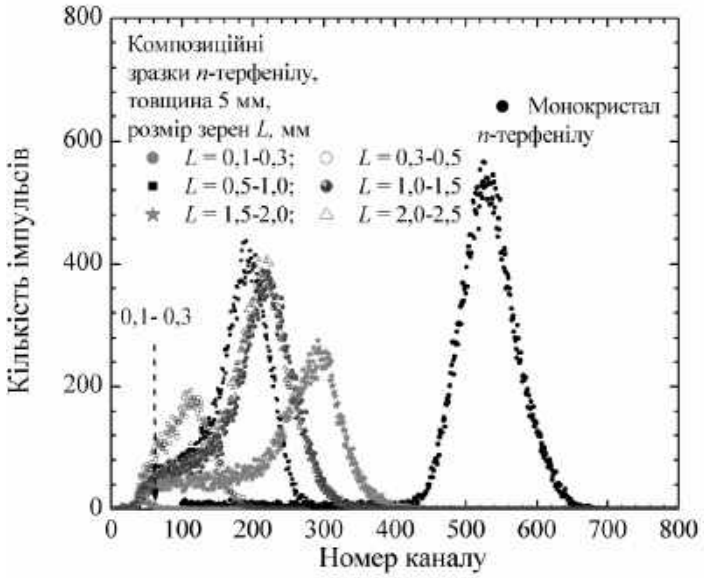

Рисунок 3.6. Спектри альфа-сцинтиляцій еталонного зразку монокристалу та композиційних сцинтиляторів *n*-терфенілу товщиною 5 мм. Розмір *L* кристалічних гранул композиційних зразків стильбену варіюється.

Таблиця 3.4

Відносний світловий вихід $LY_{відн}$ композиційних сцинтиляторів *n*-терфенілу товщиною 5 мм

Зразок	Розмір гранул *L*, мм	$LY_{відн}$, %
Монокристал	–	100,0
Композиційний сцинтилятор	0,1–0,3	6,9
–//–	0,3–0,5	20,5
–//–	0,5–1,0	35,9
–//–	1,0–1,5	40,3
–//–	1,5–2,0	55,3
–//–	2,0–2,5	41,5

Результати досліджень зразків композиційних сцинтиляторів стильбену та *п*-терфенілу (див. рисунки. 3.5, 3,5, таблиці. 3.3 та 3.4), товщина яких дорівнює товщині відповідних монокристалів, показали що для зразків із розміром гранул L = 0,1–0,3 мм значення відносного світлового виходу $LY_{відн}$ є дуже низькими (для *п*-терфенілу сигнал практично відсутній). Виходячи з цього, для вивчення радіолюмінесценції доречно використовувати зразків, які містять кристалічні зерна розміром $L \geq 0{,}3$ мм.

3.2. Оптичне пропускання зразків композиційних сцинтиляторів стильбену та *п*-терфенілу

Були проведені вимірювання оптичного пропускання T по відношенню до повітря одношарових композиційних зразків на основі стильбену, *п*-терфенілу та *п*-терфенілу активованого 0,1 мас.% ДФБ у діапазоні довжин хвиль 190–800 нм. Графік залежностей T від довжини хвилі для зразків на основі стильбену наведено на рисунку 3.7.

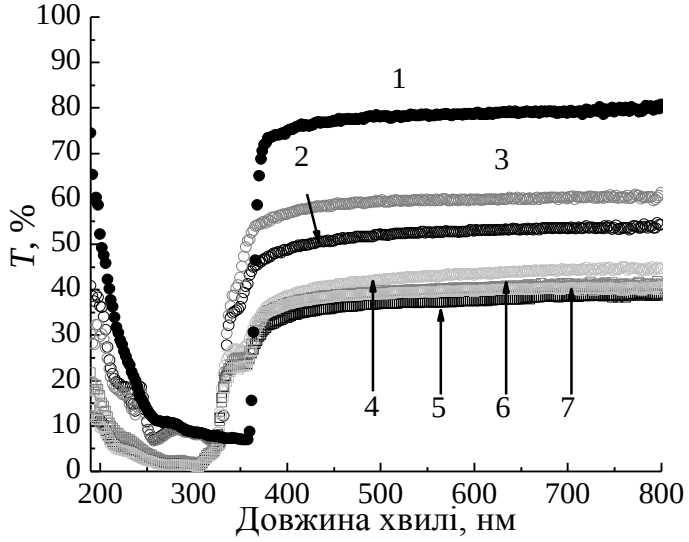

Рисунок 3.7. Спектри оптичного пропускання T монокристалу стильбену та одношарових композиційних сцинтиляторів на основі стильбену. Позначення розмірів гранул такі ж, як на рисунку 3.3.

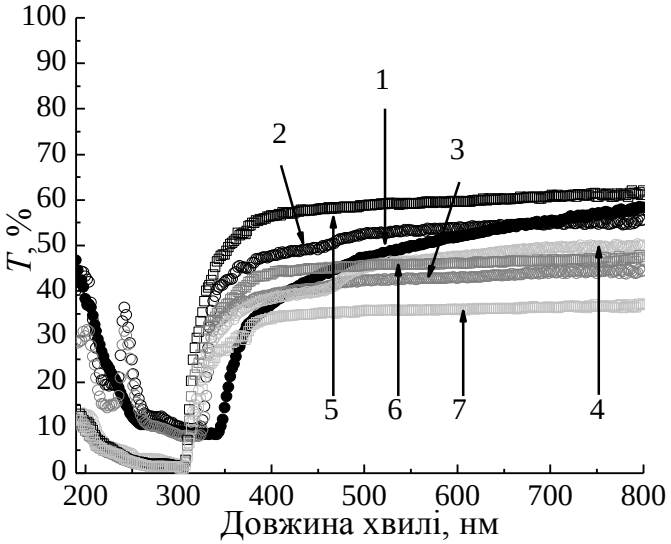

Рисунок 3.8. Спектри оптичного пропускання *T* монокристалу *n*-терфенілу та одношарових композиційних сцинтиляторів на основі *n*-терфенілу. Позначення розмірів гранул такі ж, як на рисунку 3.3.

Графік залежностей *T* від довжини хвилі для зразків на основі *n*-терфенілу та *n*-терфенілу активованого 0,1 мас.% ДФБ наведено на рисунках 3.8 та 3.9, відповідно.

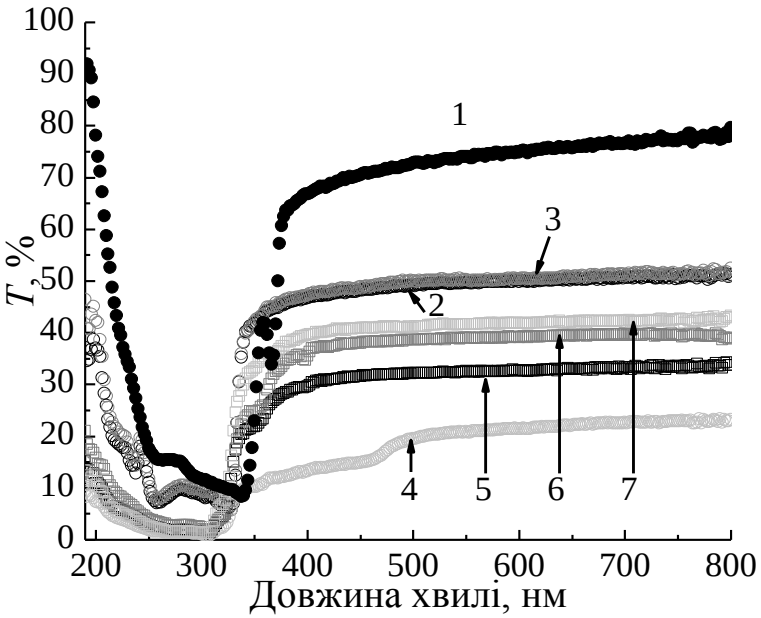

Рисунок 3.9. Спектри оптичного пропускання *T* монокристалу *n*-терфенілу активованого 0,1 мас.% ДФБ та одношарових композиційних сцинтиляторів, які містять гранули *n*-терфенілу активованого 0,1 мас.% ДФБ. Позначення розмірів гранул такі ж, як на рисунку 3.3.

На рисунку 3.10 наведені залежності оптичного пропускання *T* одношарових композиційних сцинтиляторів від середнього розміру гранул.

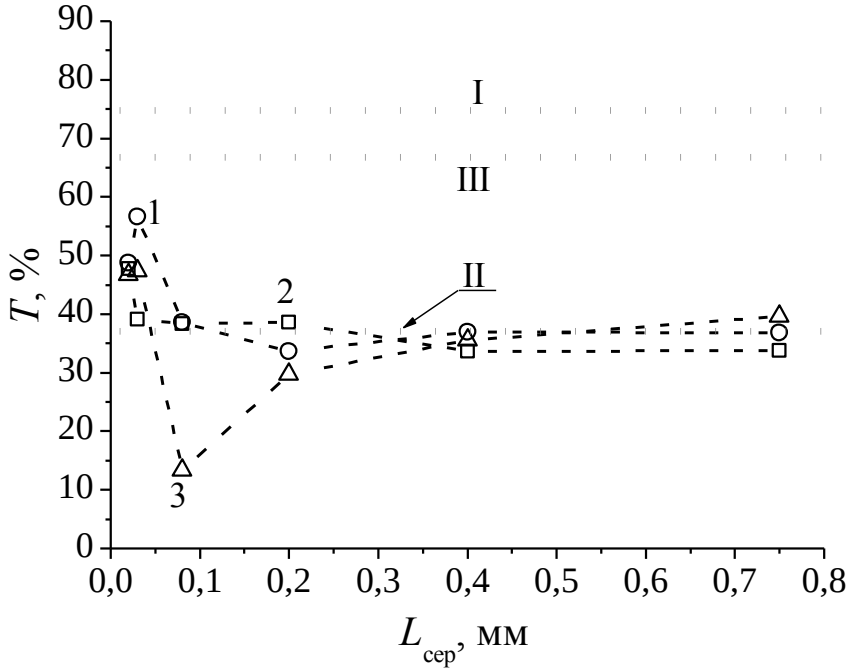

Рисунок 3.10. Оптичне пропускання *T* одношарових композиційних сцинтиляторів на довжині хвилі світла 400 нм. Пунктирні лінії I, II, та III показують оптичне пропускання для монокристалічних зразків стильбену, *n*-терфенілу та *n*-терфенілу активованого 0,1 мас.% ДФБ, відповідно. Позначення матеріалів таке ж, як на рисунку 3.4.

Як видно з рисунків 3.7, 3.8 та 3.9 оптичне пропускання світла в області люмінесценції представлених одношарових композиційних матеріалів (>390 нм) є достатньо високим.

Для порівняння були проведені виміри оптичного пропускання *T* для композиційних сцинтиляторів стильбену та *n*-терфенілу товщиною 5 мм із різними фракціями гранул. Спекти пропускання вимірювалися в діапазоні довжин хвиль λ від 200 до 800 нм. Результати вимірів для зразків стильбену та *n*-терфенілу представлено на рисунках 3.11 та 3.12, відповідно.

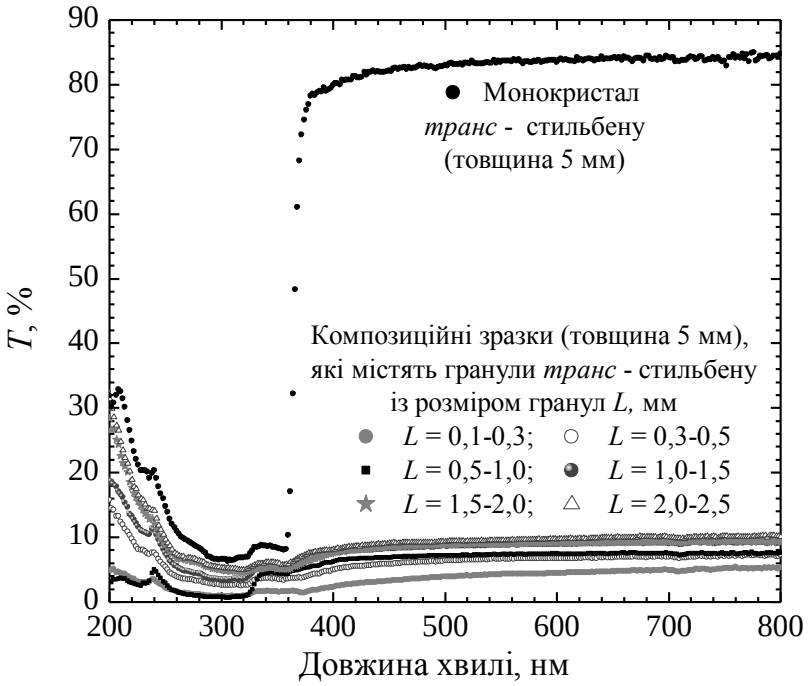

Рисунок 3.11. Спектри оптичного пропускання еталонного зразку монокристалу та композиційних сцинтиляторів стильбену товщиною 5 мм. Розмір *L* кристалічних гранул композиційних зразків стильбену варіюється.

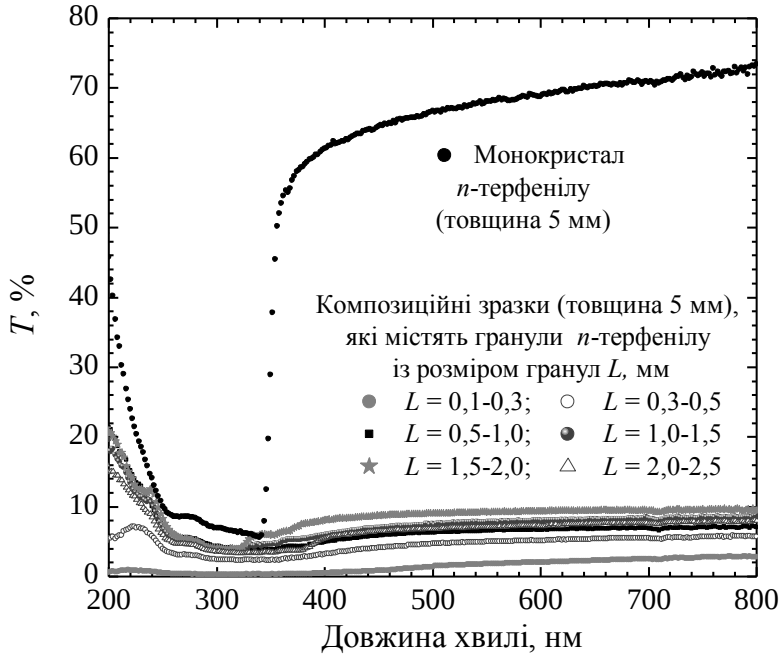

Рисунок 3.12. Спектри оптичного пропускання еталонного зразку монокристалу *n*-терфенілу та композиційних сцинтиляторів, які містять гранули *n*-терфенілу розміром *L*. Товщина зразків 5 мм.

В таблицях 3.5 та 3.6. представлені значення оптичного пропускання T для зразків монокристалу та композиційних сцинтиляторів стильбену та *n*-терфенілу, відповідно, для довжини хвилі λ яка відповідає максимуму люмінесценції цих матеріалів. Як для стильбену, так й для *n*-терфенілу $\lambda_{люм}$ дорівнює 390 нм [2].

Таблиця 3.5

Пропускання T композиційних сцинтиляторів стильбену товщиною 5 мм (λ = 390*нм*)

Зразок	Розмір гранул L, мм	T, %
Монокристал	–	78,9
Композиційний сцинтилятор	0,1–0,3	2,1
–//–	0,3–0,5	4,6
–//–	0,5–1,0	5,6
–//–	1,0–1,5	7,2
–//–	1,5–2,0	7,1
–//–	2,0–2,5	7,9

Таблиця 3.6

Пропускання T композиційних сцинтиляторів *n*-терфенілу товщиною 5 мм (λ = 390*нм*)

Зразок	Розмір гранул L, мм	T, %
Монокристал	–	60,1
Композиційний сцинтилятор	0,1–0,3	0,5
–//–	0,3–0,5	3,0
–//–	0,5–1,0	4,6
–//–	1,0–1,5	5,6
–//–	1,5–2,0	7,8
–//–	2,0–2,5	4,7

Як для стильбену, так й для *n*-терфенілу залежність значень *T* для від фракції кристалічних гранул композиційних сцинтиляторів повністю корелює з характером залежності $LY_{відн}$ від *L* (дивись рисунки 3.5 та 3.6). Тобто, для вивчення радіолюмінесценції зразків товщиною 5 мм, доречно використовувати кристалічні зерна розміром $L \geq 0{,}3$ мм.

3.3. Спектри поглинання, швидкої та затриманої флуоресценції, фосфоресценції органічних сцинтиляторів при кімнатній температурі та при 77 K

На рисунках 3.13-3.17 представлені результати вимірів оптичних спектрів, які отримано з метою відпрацювання експериментальних методів дослідження спектрів поглинання, миттєвої і затриманої флюоресценції, а також фосфоресценції органічних сцинтиляторів при кімнатній температурі та температурі 77 K.

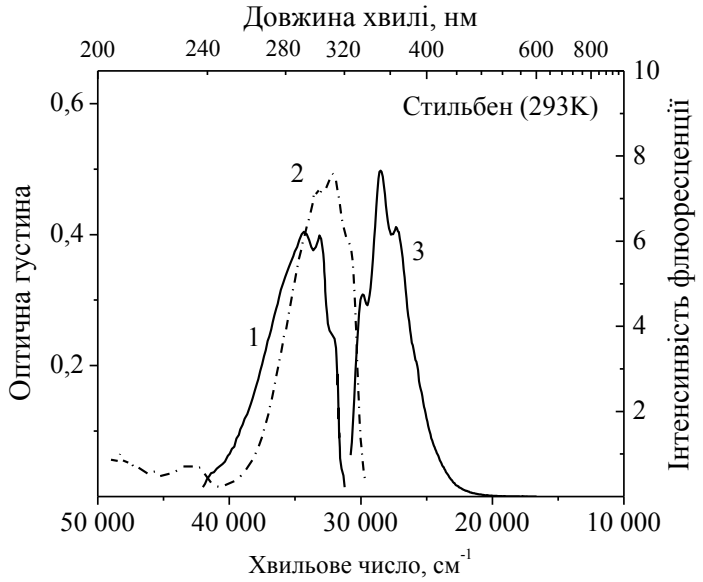

Рисунок 3.13. Оптичні спектри: 1 – поглинання, 2 – збудження флуоресценції (випромінювання λ = 350 нм) та 3 – флуоресценції (збудження λ = 311 нм) розчину стильбену в діоксані при кімнатній температурі.

Як можна бачити з представлених графіків, спектри флуоресценції і поглинання симетричні. Спектри збудження флуоресценції схожі за формою і положенням до спектрів поглинання. Це свідчить про те, що поглинають і випромінюють одні й ті самі центри досліджуваних сполук.

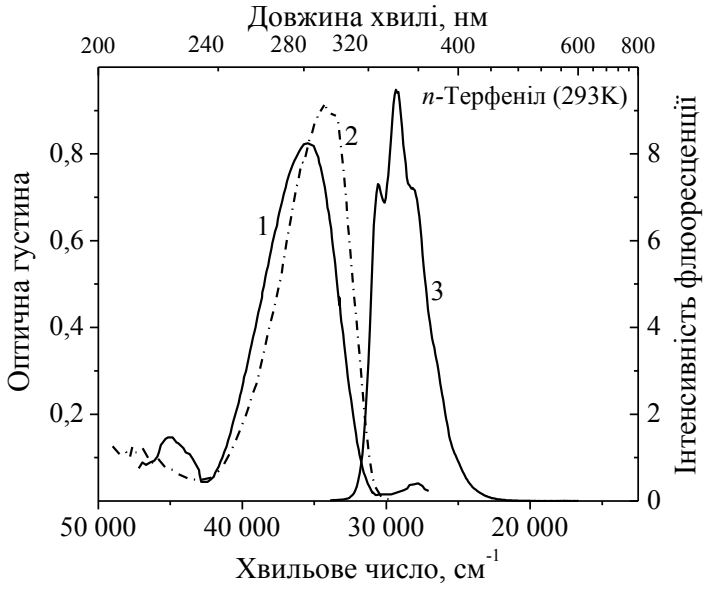

Рисунок 3.14. Оптичні спектри: 1– поглинання, 2 – збудження флуоресценції (випромінювання λ = 358 нм) та 3 – флуоресценції (збудження λ = 282 нм) розчину *n*-терфенілу в діоксані при кімнатній температурі.

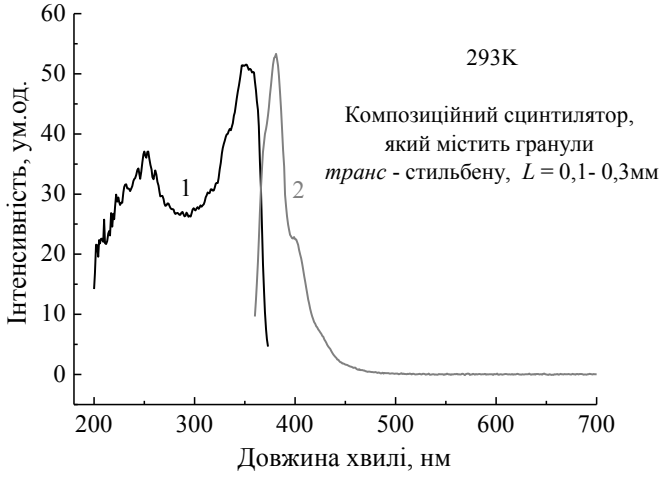

Рисунок 3.15. Оптичні спектри: 1 – збудження флуоресценції (випромінювання λ = 383 нм) та 2 – флуоресценції (збудження λ = 350 нм) зразку композиційного сцинтилятору, який містить гранули стильбену з розміром гранул L ~ 0,1– 0,3 мм при кімнатній температурі.

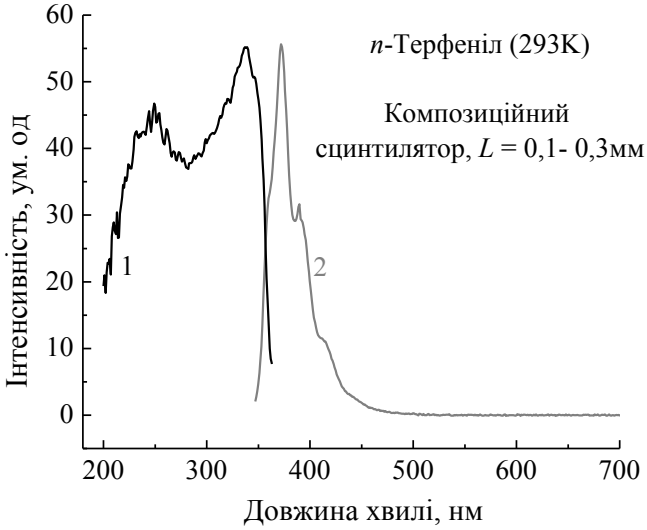

Рисунок 3.16. Оптичні спектри: 1 – збудження флуоресценції (випромінювання λ = 373 нм) та 2 – флуоресценції (збудження λ = 348 нм) зразку композиційного сцинтилятору *n*-терфенілу з розміром гранул 0,1–0,3 мм при кімнатній температурі.

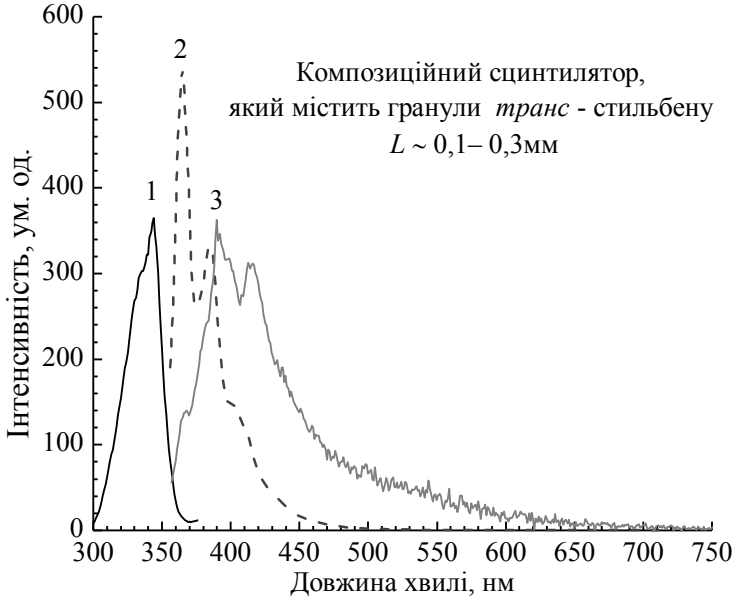

Рисунок 3.17. Оптичні спектри: 1 – збудження флуоресценції (випромінювання λ = 386 нм), 2 – флуоресценції (збудження λ = 342 нм), 3 – фосфоресценції (збудження λ = 342 нм) зразку композиційного сцинтилятору, який містить гранули стильбену з розміром 0,1– 0,3 мм. Температура - 77 К.

3.4. Результати вимірювання спектрів люмінесценції

Були проведені дослідження спектрів люмінесценції, коли збудження зразка відбувалося світлом у червоній області спектра (в області поглинання молекулярних триплетних екситонів), а сигнал реєструвався в синій області спектра, тобто в області флуоресценції. Ще раз підкреслимо, що у такій ситуації можлива лише реєстрація світла, яке виникає тільки в результаті злиття триплетних екситонів.

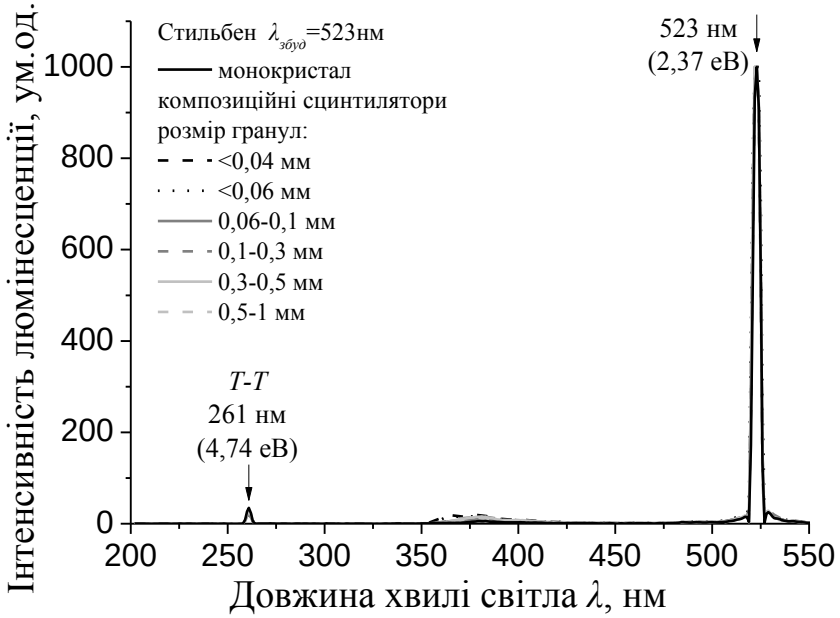

Рисунок 3.18. Спектри люмінесценції монокристалу та композиційних сцинтиляторів на основі гранул стильбену при збуджені світлом із довжиною хвилі 523 нм.

На рисунках 3.18 та 3.19 наведено спектри люмінесценції стильбену при збуджені світлом із довжиною хвилі 523 та 563 нм, відповідно.

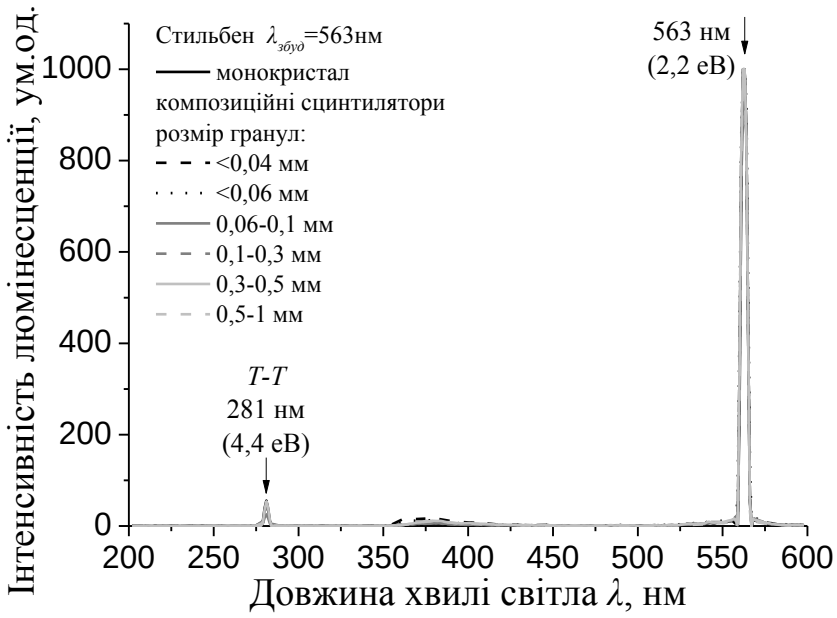

Рисунок 3.19. Спектри люмінесценції монокристалу та композиційних сцинтиляторів на основі гранул стильбену при збуджені світлом із довжиною хвилі 563 нм.

Як показано на рисунках 3.18 та 3.19 на спектрах люмінесценції присутні смуги збудження на довжинах хвиль 523 та 563 нм, відповідно. Разом із тим спостерігається люмінесценція в області 260 та 280 нм, відповідно. Люмінесценція із такими довжинах хвиль, при збуджені в червоній області спектру, відповідає флуоресценції із синглетного стану із подвійною енергією *T*- станів, тобто випромінюванні фотонів світла із енергією ε_{T+T}. Це так зване явище злиття триплетних екситонів [8]. Також на рисунках 3.18 та 3.19 в діапазоні довжин хвиль від 350 до 420 нм можна побачити характерну флуоресценцію стильбену, яка має низьку інтенсивність, що в свою чергу пов’язано з непрямим збудженням центрів люмінесценції стильбену (збудження через триплет-триплетну анігіляцію).

На рисунку 3.20 наведено спектри люмінесценції *n*-терфенілу (монокристал та композиційні сцинтилятори з різним розміром гранул) при збуджені світлом із довжиною хвилі 496 нм.

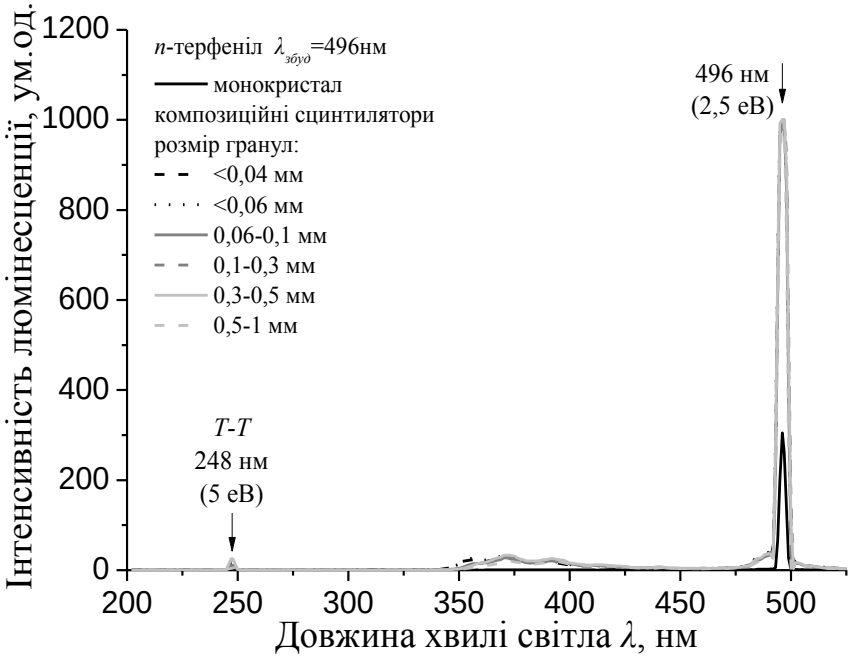

Рисунок 3.20. Спектри люмінесценції монокристалу та композиційних сцинтиляторів на основі гранул *n*-терфенілу при збуджені світлом із довжиною хвилі 496 нм.

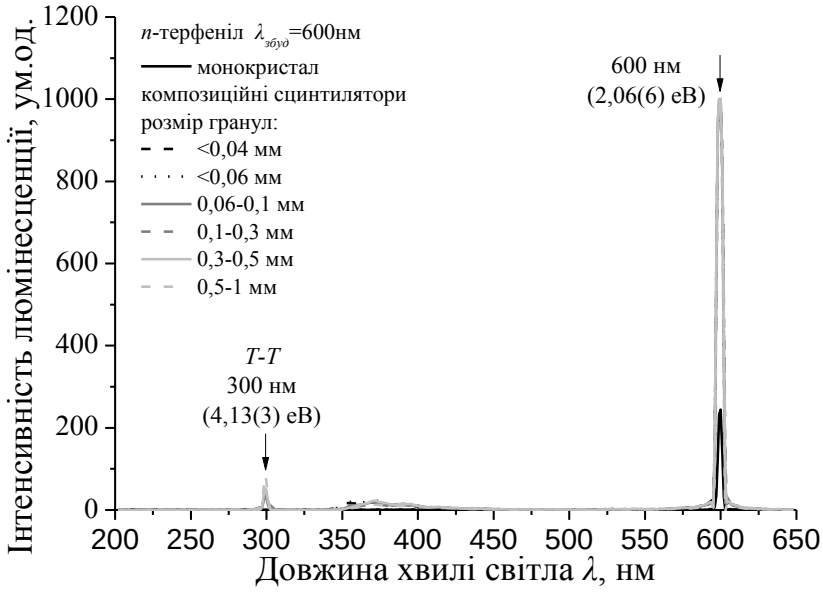

Рисунок 3.21. Спектри люмінесценції монокристалу та композиційних сцинтиляторів на основі гранул *n*-терфенілу при збуджені світлом із довжиною хвилі 600 нм.

На рисунку 3.21 наведено спектри люмінесценції *n*-терфенілу (монокристал та композиційні сцинтилятори з різним розміром гранул) при збуджені світлом із довжиною хвилі 600 нм. Так само як і на рисунках 3.18 та 3.19, на рисунках 3.20 та 3.21 наведено спектри люмінесценції при збудженні в червоній області спектру (496 та 600 нм, відповідно) на яких представлені смуги, що відповідають злиттю триплетних екситонів та формування високо збудженого синглетного стану із подвійною енергією триплетного стану (248 та 300 нм, відповідно). Разом із тим у діапазоні довжин хвиль від 350 до 425 нм можна побачити характерну люмінесценцію *n*-терфенілу, яка має низьку інтенсивність, що в свою чергу так само пов'язано із збудженням центрів люмінесценції *n*-терфенілу через триплет-триплетну анігіляцію.

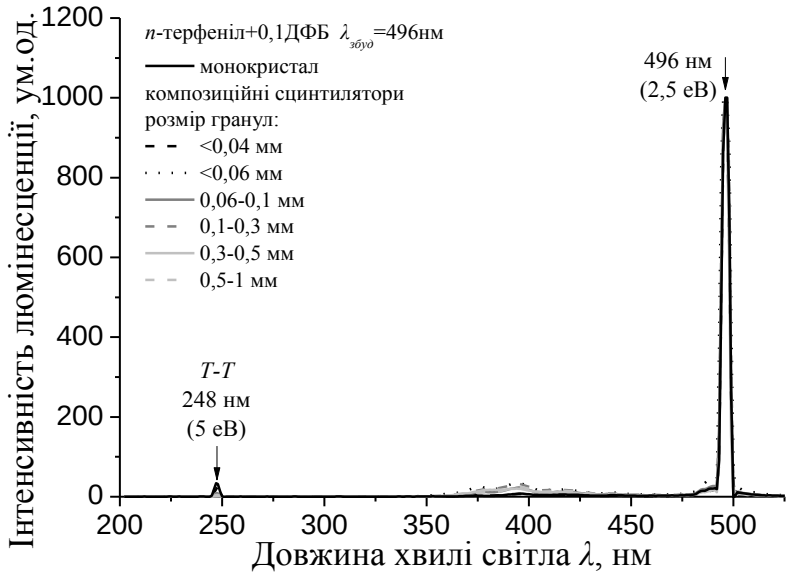

Рисунок 3.22. Спектри люмінесценції монокристалу та композиційних сцинтиляторів на основі гранул *n*-терфенілу, що активовано 0,1% ДФБ при збуджені світлом із довжиною хвилі 496 нм.

На рисунку 3.22 наведено спектри люмінесценції *n*-терфенілу (монокристал та композиційні сцинтилятори з різним розміром гранул), який активовано 0,1% ДФБ при збуджені світлом із довжиною хвилі 496 нм.

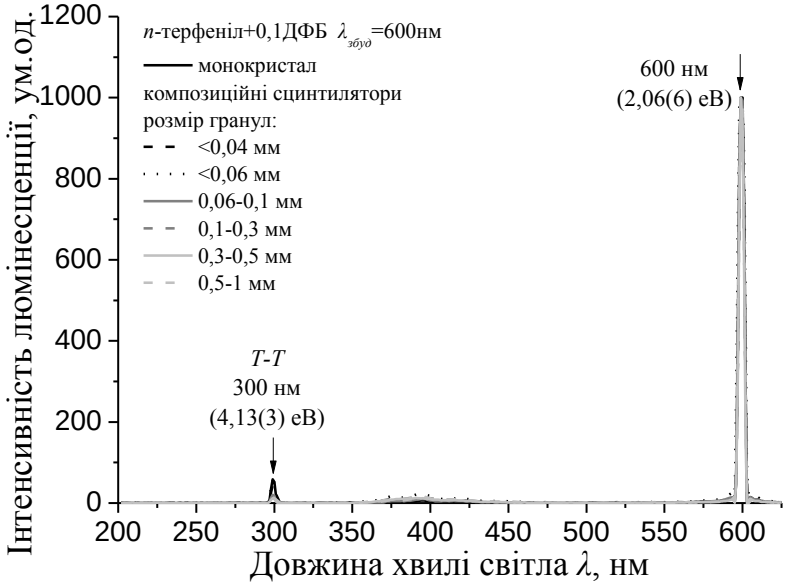

Рисунок 3.23. Спектри люмінесценції монокристалу та композиційних сцинтиляторів на основі гранул *n*-терфенілу, що активовано 0,1% ДФБ при збуджені світлом із довжиною хвилі 600 нм.

На рисунку 3.23 наведено спектри люмінесценції *n*-терфенілу (монокристал та композиційні сцинтилятори з різним розміром гранул), який активовано 0,1% ДФБ при збуджені світлом із довжиною хвилі 600 нм.

На рисунках 3.22 та 3.23, так само як і на попередніх рисунках спектрів люмінесценції, наведено спектри люмінесценції при збудженні в червоній області спектру (496 та 600 нм, відповідно) на яких представлені смуги що відповідають злиттю триплетних екситонів тобто формуванню стану із їх подвійною енергією (248 та 300 нм, відповідно). У діапазоні довжин хвиль від 360 до 440 нм можна побачити характерну люмінесценцію *n*-терфенілу, активованого 0,1% ДФБ, яка має низьку інтенсивність, що в свою чергу так само пов’язано із збудженням центрів люмінесценції *n*-терфенілу, активованого 0,1% ДФБ, через триплет-триплетну анігіляцію.

На рисунку 3.24 представлено порівняння інтенсивності люмінесценції для піку ε_{T+T} (у відсотках до інтенсивності збудження) від середнього розміру гранул $L_{\text{сер}}$ композиційних сцинтиляторів на основі стильбену та

монокристалу стильбену при збуджені світлом із довжиною хвилі 523 та 563 нм.

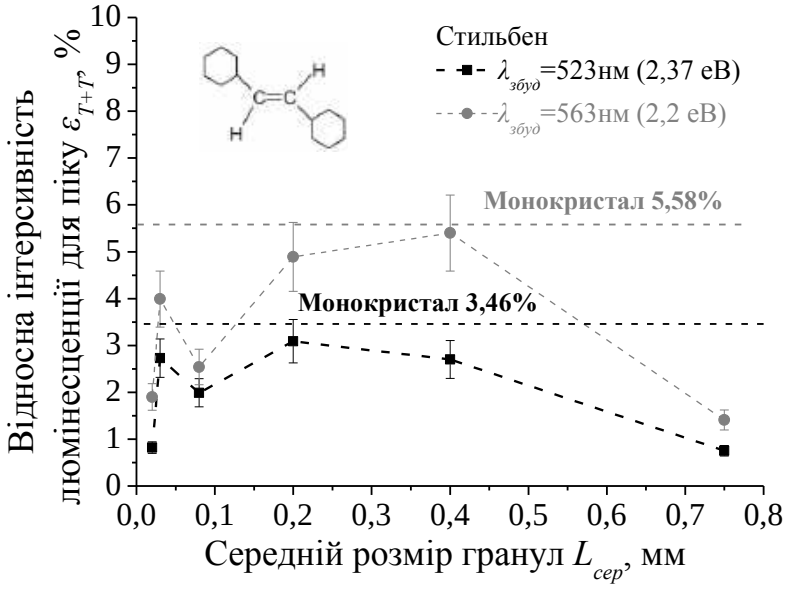

Рисунок 3.24. Залежності відносної інтенсивності люмінесценції для піку ε_{T+T} від середнього розміру гранул $L_{сер}$ композиційних сцинтиляторів на основі гранул стильбену у порівнянні з монокристалом стильбену при збуджені світлом із довжиною хвилі 523 та 563 нм.

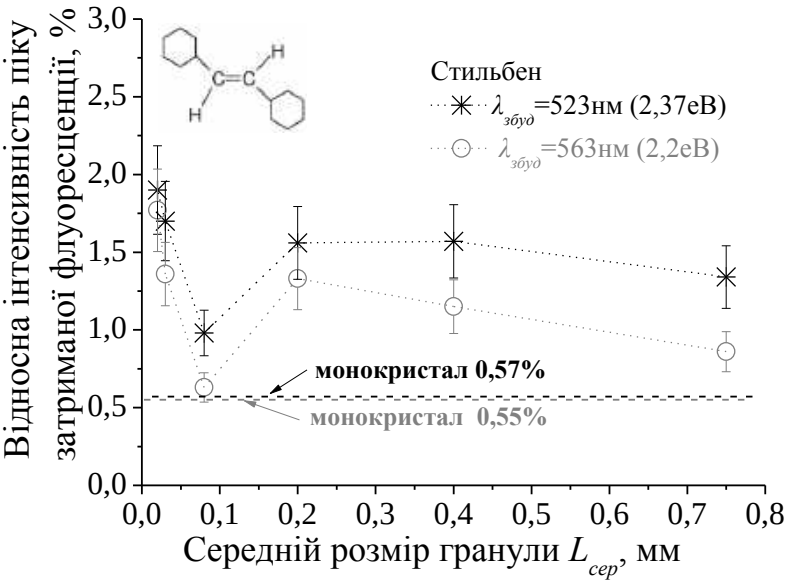

Рисунок 3.25. Залежності відносної інтенсивності піку затриманої флуоресценції композиційних сцинтиляторів від середнього розміру гранул $L_{сер}$ стильбену у порівнянні з монокристалом стильбену при збуджені світлом із довжиною хвилі 523 та 563 нм.

На рисунку 3.25 представлено порівняння інтенсивності піку затриманої флуоресценції (у відсотках до інтенсивності збудження) від середнього розміру гранул $L_{сер}$ композиційних сцинтиляторів на основі стильбену та монокристалу стильбену при збуджені світлом із довжиною хвилі 523 та 563 нм.

На рисунку 3.26 представлено порівняння інтенсивності люмінесценції для піку ε_{T+T} (у відсотках до інтенсивності збудження) від середнього розміру гранул $L_{сер}$ композиційних сцинтиляторів на основі *n*-терфенілу та монокристалу *n*-терфенілу при збуджені світлом із довжиною хвилі 496 та 600 нм.

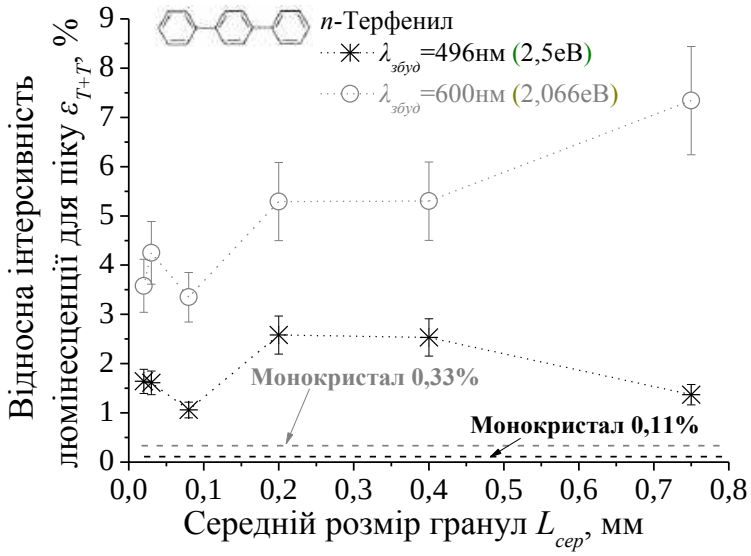

Рисунок 3.26. Залежності відносної інтенсивності люмінесценції для піку ε_{T+T} від середнього розміру гранул $L_{сер}$ композиційних сцинтиляторів на основі гранул *n*-терфенілу у порівнянні з монокристалом *n*-терфенілу при збуджені світлом із довжиною хвилі 496 та 600 нм.

На рисунку 3.27 представлено порівняння інтенсивності піку затриманої флуоресценції (у відсотках до інтенсивності збудження) від середнього розміру гранул $L_{сер}$ композиційних сцинтиляторів на основі *n*-терфенілу та

монокристалу *n*-терфенілу при збуджені світлом із довжиною хвилі 496 та 600 нм.

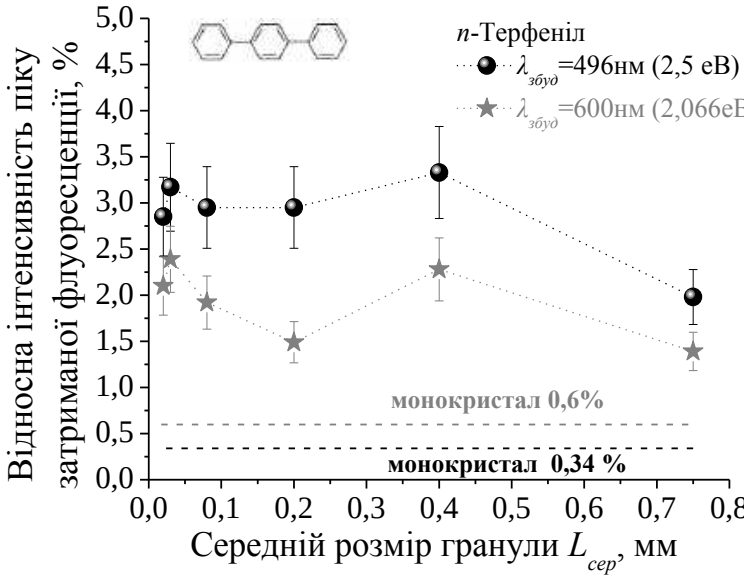

Рисунок 3.27. Залежності відносної інтенсивності піку затриманої флуоресценції від середнього розміру гранул $L_{сер}$ композиційних сцинтиляторів на основі гранул *n*-терфенілу у порівнянні з монокристалом *n*-терфенілу при збуджені світлом із довжиною хвилі 496 та 600 нм.

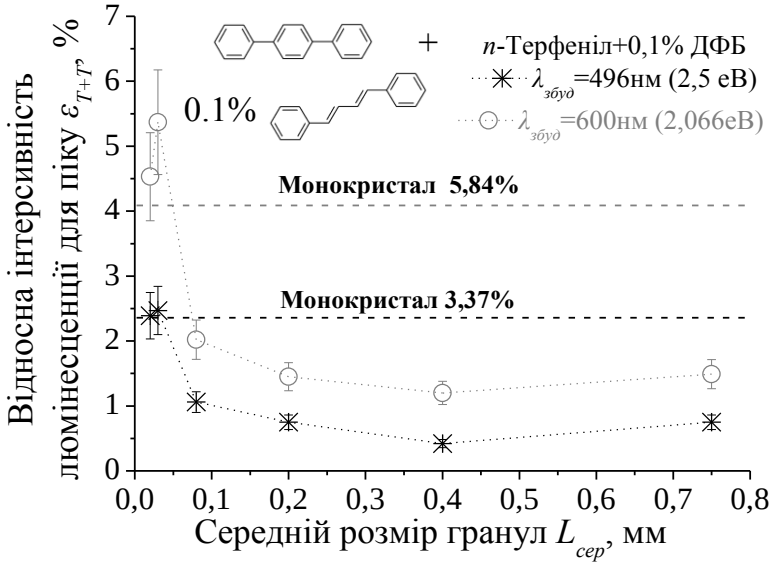

Рисунок 3.28. Залежності відносної інтенсивності люмінесценції для піку ε_{T+T} від середнього розміру гранул $L_{сер}$ композиційних сцинтиляторів на основі гранул *n*-терфенілу із 0,1% ДФБ у порівнянні з монокристалом *n*-терфенілу із 0,1% ДФБ при збуджені світлом із довжиною хвилі 496 та 600 нм.

На рисунку 3.28 представлено порівняння інтенсивності люмінесценції для піку ε_{T+T} (у відсотках до інтенсивності збудження) від середнього розміру гранул $L_{\text{сер}}$ композиційних сцинтиляторів на основі *n*-терфенілу із 0,1% ДФБ та монокристалу *n*-терфенілу із 0,1% ДФБ при збуджені світлом із довжиною хвилі 496 та 600 нм.

На рисунку 3.29 представлено порівняння інтенсивності піку затриманої флуоресценції (у відсотках до інтенсивності збудження) від середнього розміру гранул $L_{\text{сер}}$ композиційних сцинтиляторів на основі *n*-терфенілу із 0,1% ДФБ та монокристалу *n*-терфенілу із 0,1% ДФБ при збуджені світлом із довжиною хвилі 496 та 600 нм.

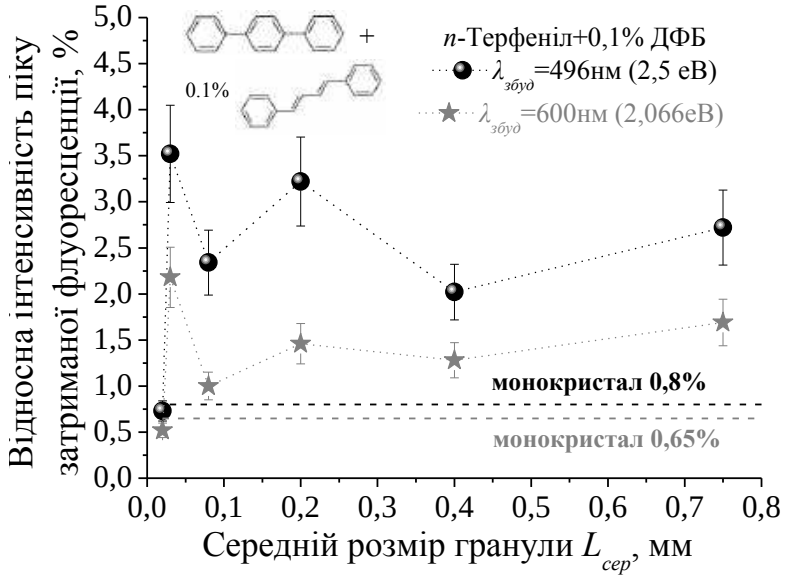

Рисунок 3.29. Залежності відносної інтенсивності піку затриманої флуоресценції від середнього розміру гранул $L_{\text{сер}}$ композиційних сцинтиляторів на основі гранул *n*-терфенілу із 0,1% ДФБ у порівнянні з монокристалом *n*-терфенілу із 0,1% ДФБ при збуджені світлом із довжиною хвилі 496 та 600 нм.

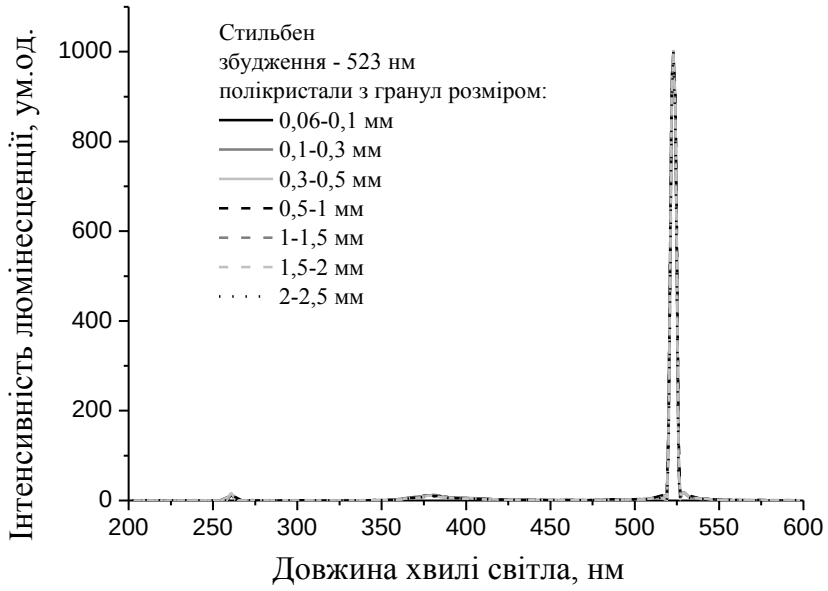

Рисунок 3.30. Спектри люмінесценції полікристалічних сцинтиляторів на основі гранул стильбену при збуджені світлом із довжиною хвилі 523 нм.

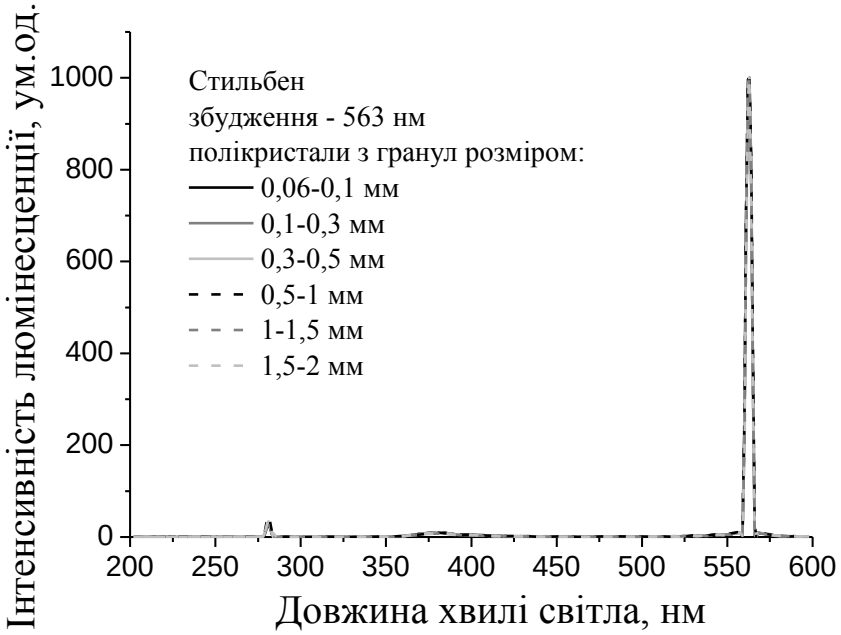

Рисунок 3.31. Спектри люмінесценції полікристалічних сцинтиляторів на основі гранул стильбену при збуджені світлом із довжиною хвилі 563 нм.

На рисунках 3.30 та 3.31 наведено спектри люмінесценції зразків полікристалів на основі гранул стильбену при збуджені світлом із довжиною хвилі 523 та 563 нм, відповідно.

Як показано на рисунках 3.30 та 3.31 на спектрах люмінесценції присутні смуги збудження на довжинах хвиль 523 та 563 нм, відповідно. Разом із тим спостерігається люмінесценція в області 260 та 280 нм, відповідно. Люмінесценція із такими довжинах хвиль, при збуджені в червоній області спектру, відповідає флуоресценції із синглетного стану із подвійною енергією *T*- станів, тобто випромінюванні фотонів світла із енергією ε_{T+T}. Це так зване явище злиття триплетних екситонів [8]. Також на рисунках 3.30 та 3.31 в діапазоні довжин хвиль від 350 до 420 нм можна побачити характерну флуоресценцію стильбену, яка має низьку інтенсивність, що в свою чергу пов’язано з непрямим збудженням центрів люмінесценції стильбену (збудження через триплет-триплетну анігіляцію).

На рисунку 3.32 наведено спектри люмінесценції *n*-терфенілу (полікристалічні сцинтилятори з різним розміром гранул) при збуджені світлом із довжиною хвилі 496 нм.

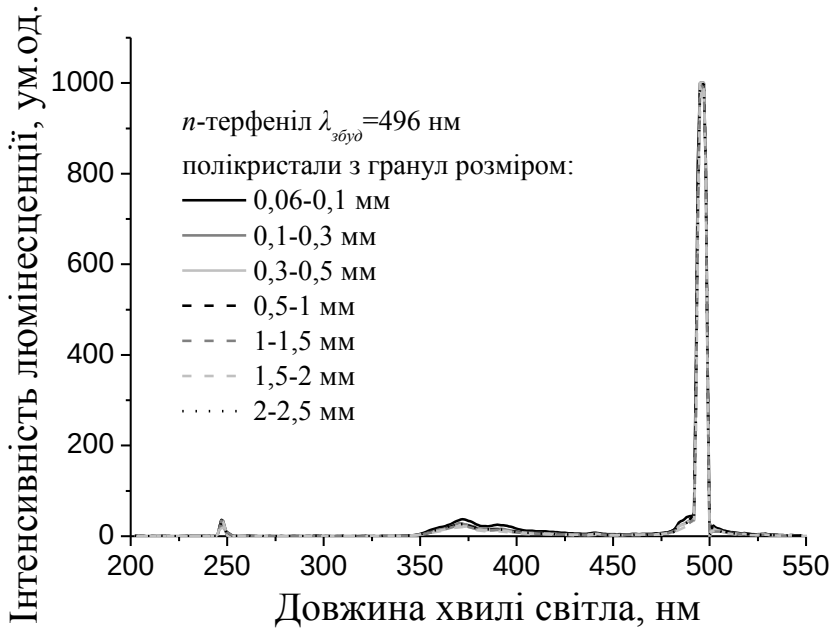

Рисунок 3.32. Спектри люмінесценції полікристалічних сцинтиляторів на основі гранул *n*-терфенілу при збуджені світлом із довжиною хвилі 496 нм.

На рисунку 3.33 наведено спектри люмінесценції *n*-терфенілу (полікристалічні сцинтилятори з різним розміром гранул) при збуджені світлом із довжиною хвилі 600 нм.

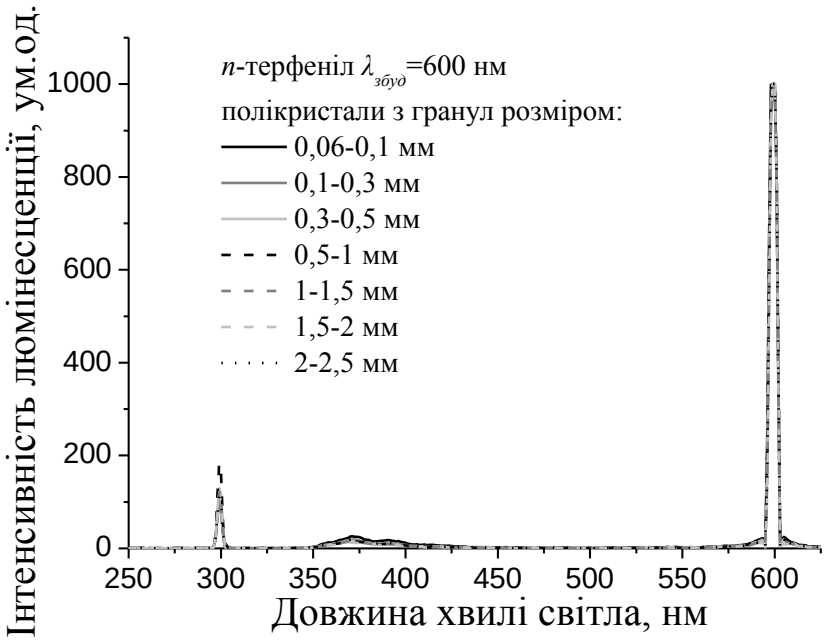

Рисунок 3.33. Спектри люмінесценції полікристалічних сцинтиляторів на основі гранул *n*-терфенілу при збуджені світлом із довжиною хвилі 496 нм.

Так само як і на рисунках 3.30 та 3.31, на рисунках 3.32 та 3.33 наведено спектри люмінесценції при збудженні в червоній області спектру (496 та 600 нм, відповідно) на яких представлені смуги, що відповідають злиттю триплетних екситонів та формування високо збудженого синглетного стану із подвійною енергією триплетного стану (248 та 300 нм, відповідно). Разом із тим у діапазоні довжин хвиль від 350 до 425 нм можна побачити характерну люмінесценцію *n*-терфенілу, яка має низьку інтенсивність, що в свою чергу так само пов’язано із збудженням центрів люмінесценції *n*-терфенілу через триплет-триплетну анігіляцію.

На рисунку 3.34 наведено спектри люмінесценції *n*-терфенілу (полікристалічні сцинтилятори з різним розміром гранул), який активовано 0,3% ДФБ при збуджені світлом із довжиною хвилі 496 нм.

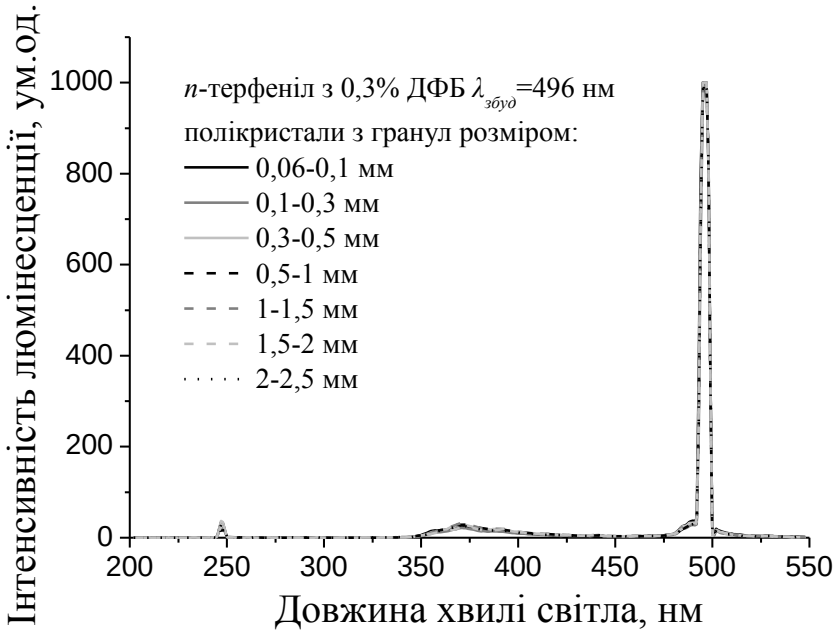

Рисунок 3.34. Спектри люмінесценції монокристалу та композиційних сцинтиляторів на основі гранул *n*-терфенілу, що активовано 0,3% ДФБ при збуджені світлом із довжиною хвилі 496 нм.

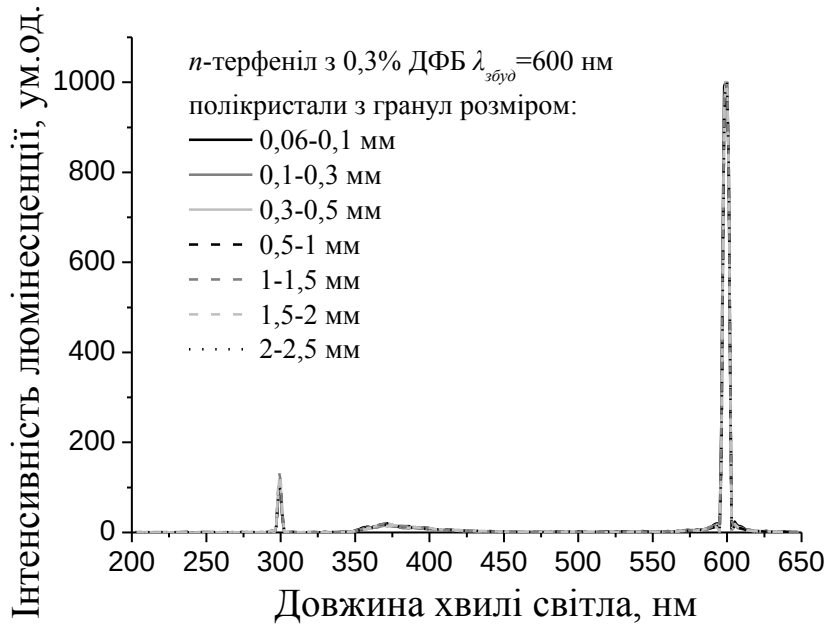

Рисунок 3.35. Спектри люмінесценції монокристалу та композиційних сцинтиляторів на основі гранул *n*-терфенілу, що активовано 0,3% ДФБ при збуджені світлом із довжиною хвилі 600 нм.

На рисунку 3.35 наведено спектри люмінесценції *n*-терфенілу

(монокристал та композиційні сцинтилятори з різним розміром гранул), який активовано 0,3% ДФБ при збуджені світлом із довжиною хвилі 600 нм.

На рисунках 3.34 та 3.35, так само як і на попередніх рисунках спектрів люмінесценції, наведено спектри люмінесценції при збудженні в червоній області спектру (496 та 600 нм, відповідно) на яких представлені смуги що відповідають злиттю триплетних екситонів тобто формуванню стану із їх подвійною енергією (248 та 300 нм, відповідно). У діапазоні довжин хвиль від 360 до 440 нм можна побачити характерну люмінесценцію *n*-терфенілу, активованого 0,3% ДФБ, яка має низьку інтенсивність, що в свою чергу так само пов'язано із збудженням центрів люмінесценції *n*-терфенілу, активованого 0,3% ДФБ, через триплет-триплетну анігіляцію.

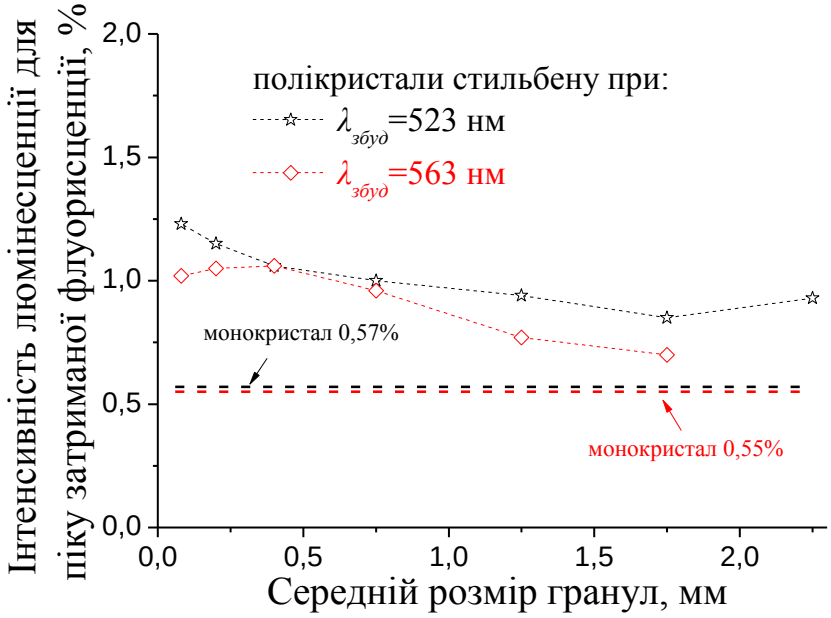

Рисунок 3.36. Залежності відносної інтенсивності піку затриманої флуоресценції полікристалічних сцинтиляторів від середнього розміру гранул $L_{сер}$ стильбену у порівнянні з монокристалом стильбену при збуджені світлом із довжиною хвилі 523 та 563 нм.

На рисунку 3.36 представлено порівняння інтенсивності піку затриманої флуоресценції (у відсотках до інтенсивності збудження) від середнього розміру гранул $L_{сер}$ полікристалічних сцинтиляторів на основі стильбену та

монокристалу стильбену при збуджені світлом із довжиною хвилі 523 та 563 нм.

На рисунку 3.37 представлено порівняння інтенсивності піку затриманої флуоресценції (у відсотках до інтенсивності збудження) від середнього розміру гранул $L_{сер}$ полікристалічних сцинтиляторів на основі *n*-терфенілу та монокристалу *n*-терфенілу при збуджені світлом із довжиною хвилі 496 та 600 нм.

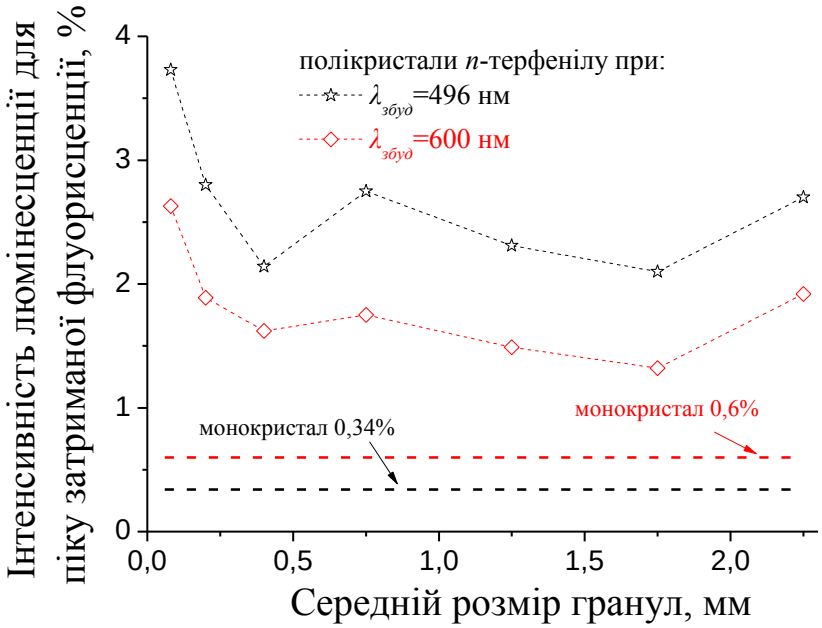

Рисунок 3.37. Залежності відносної інтенсивності піку затриманої флуоресценції від середнього розміру гранул $L_{сер}$ полікристалічних сцинтиляторів на основі гранул *n*-терфенілу у порівнянні з монокристалом *n*-терфенілу при збуджені світлом із довжиною хвилі 496 та 600 нм.

Таким чином, нами спостерігався спектр флуоресценції, спектральний склад якого був аналогічний спектру миттєвої флуоресценції. За умовами експерименту збудження було можливе тільки через злиття триплетних екситонів, тому це був спектр затриманої флуоресценції. Через заборону по мультиплетності, його інтенсивність досягала декількох відсотків від інтенсивності падаючого світла. Відзначимо, що для ситуації, яка

розглядається, таку інтенсивність затриманої флуоресценції можна вважати навіть досить великою. Різке падіння числа збуджень обумовлено забороною на пряме збудження T_1- станів. Відносно висока інтенсивність затриманої флуоресценції стала можливою через те, що зразок збуджувався не окремими імпульсами світла, а в стаціонарному режимі. В стаціонарному режимі збудження, падіння інтенсивності затриманої флуоресценції частково компенсувалося високою частотою появи збуджуючих фотонів світла.

Якщо h – це стала Планка, то як інтенсивність піку з довжиною хвилі світла $\lambda = h/2\varepsilon(T_1)$, так й інтенсивність сповільненої флуоресценції $I_D(\lambda)$ немонотонно залежали від розмірів гранул. Введено позначення λ – довжина хвилі світла, фотон якого має енергію $\varepsilon = hc/\lambda$, де c – це швидкість світла. Ці результати, ілюструють рисунки 3.18-3.29.

Як видно із результатів досліджень спектрів люмінесценції найменше значення I_D було отримано для монокристалів. Це пояснюється тим, що у цих об’єктах можливість «розбігання» T_1- станів від точки їх виникнення в об’ємі сцинтилятора, практично, нічим не обмежена. Важливо й те, що початкова густина T_1-станів, які збуджені світлом, на порядки величини менше, ніж їх густина у треку альфа частинки. Ймовірність утворення T_1+T_1 – стану в монокристалах (мабуть, виключаючи неактивований *n*-терфеніл) є досить високою. Про це свідчать порівняно високі інтенсивності піку, який відповідає енергії фотона світла $2\varepsilon(T_1)$. Ця інтенсивність досягає до 3–6% від інтенсивності збуджуючого світла.

Найбільше значення I_D спостерігалося для композиційних сцинтиляторів, що містять гранули з розмірами меншими за 0,06 мм. Для композиційних сцинтиляторів, що містять гранули великих розмірів, зі збільшенням розмірів гранул, спостерігався розкид значень I_D, який перевищує тенденцію I_D до збільшення або до зменшення. Такий розкид обумовлений низькою точністю визначення I_D. Дійсно, значення I_D не перевищують 6% відносно інтенсивності збуджуючого світла. До того ж, точність визначення інтенсивності світла, яке виходить на зразок із

спектрофлюориметру сама по собі не є високою. Все це обумовлює те, що відносний розкид значень I_D досить великий і досягає приблизно 15%.

Велике значення I_D у композиційних сцинтиляторів у порівнянні з монокристалом пов'язано з давно передбаченим ефектом відбиття екситонів на межі органічного мікромонокристалу (гранули) [24]. Це, в свою чергу, обумовлює збільшення ймовірності зустрічі T_1- екситонів в об'ємі гранули, що зменшується, за тривалий час їх життя (~ 10^{-2}с) [25]. Отже, це зумовлює збільшення значень I_D у порівнянні з об'ємним монокристалом. Тобто, цей ефект може зростати зі зменшенням розміру гранул. Спостерігався скачок значень I_D при переході від композиційних сцинтиляторів, що містять фракцію гранул менш 0,06 мм, до тих, що містять гранули більших розмірів.

Безумовно, кількісні оцінки цього ефекту вимагають окремого аналізу. Однак, відразу ж відзначимо, що перехід від гранул із розмірами меншими 0,06 мм до гранул більших розмірів, це перехід від зразків що містять гранули на липкій стрічці до зразків, що містять гранули на поверхні гель-композиції. Не виключено, що цей момент може виявитися важливим.

Примушує задуматися й той факт, що зазначені особливості є загальними для зразків різного хімічного складу, опромінення яких проводилося різними довжинами хвиль світла поблизу смуги поглинання їх T_1- станів.

3.5. Результати вимірювань форми імпульсу радіолюмінесценції зразків композиційних сцинтиляторів стильбену.

Нами проводилися дослідження форми сцинтиляційного імпульсу (криві кінетики радіолюмінесценції) зразків композиційних сцинтиляторів стильбену кубічної форми розміром 20×20×20 мм. Досліджувалися зразки з розміром зерен L: 0,1-0,3; 0,3-0,5; 0,5-1,0; 1,0-1,5; 1,5-2,0 та 2,0-2,5 мм. Зразки збуджувалися альфа-частинками ізотопу ^{239}Pu, тобто частинками з високими значеннями питомих енергетичних втрат, в треку яких в органічних

середовищах генеруються як синглетні, так й триплетні збуджені стани. Результати вимірів наведено на рисунках 3.38-3.41.

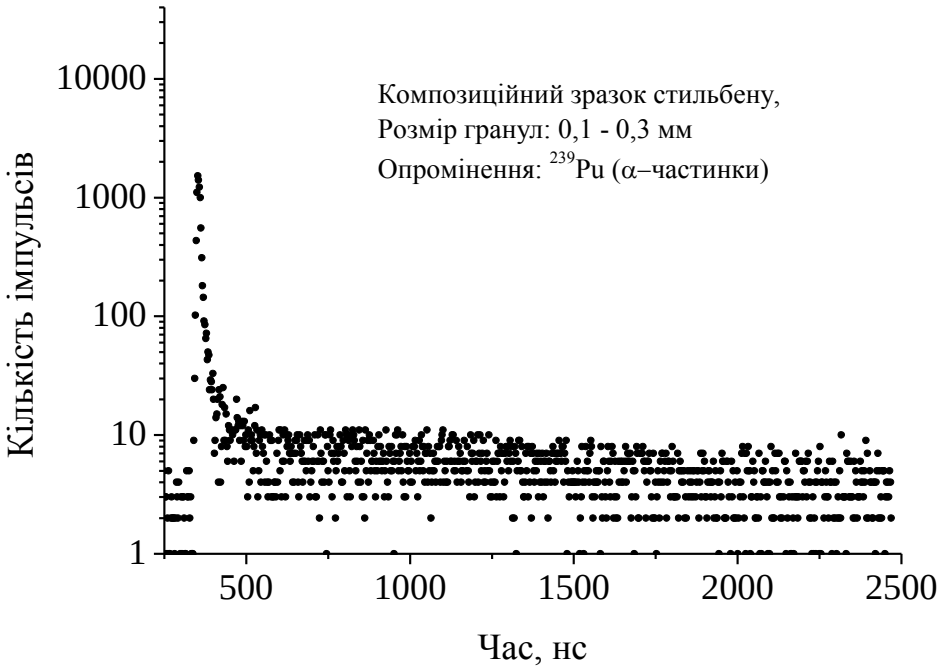

Рисунок 3.38. Форма імпульсу радіолюмінесценції композиційного сцинтилятора стильбену с розміром гранул *L* від 0,1 до 0,3 мм, який збуджується альфа-частинками джерела ^{239}Pu.

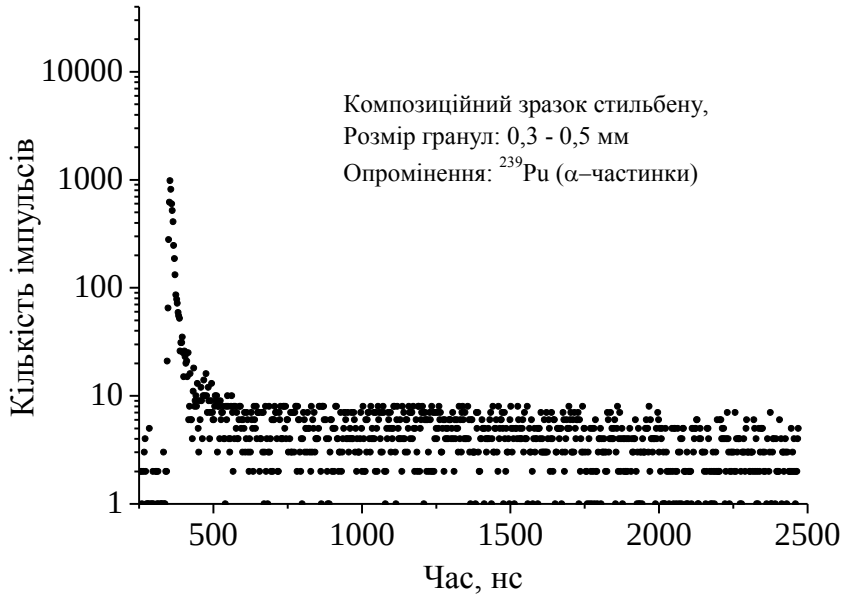

Рисунок 3.39. Форма імпульсу радіолюмінесценції композиційного сцинтилятора стильбену с розміром гранул *L* від 0,3 до 0,5 мм, який збуджується альфа-частинками джерела ^{239}Pu.

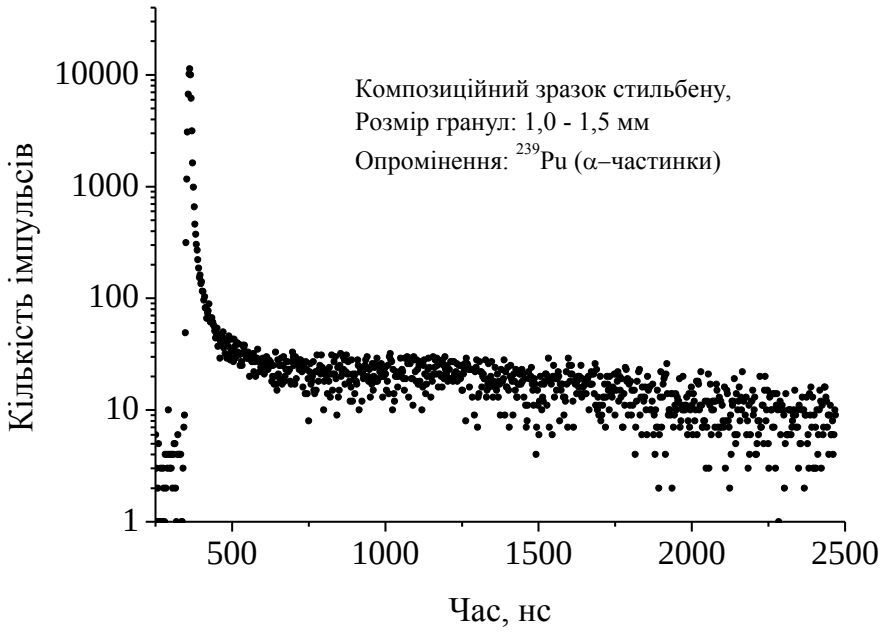

Рисунок 3.40. Форма імпульсу радіолюмінесценції композиційного сцинтилятора стильбену с розміром гранул *L* від 1,0 до 1,5 мм, який збуджується альфа-частинками джерела ^{239}Pu.

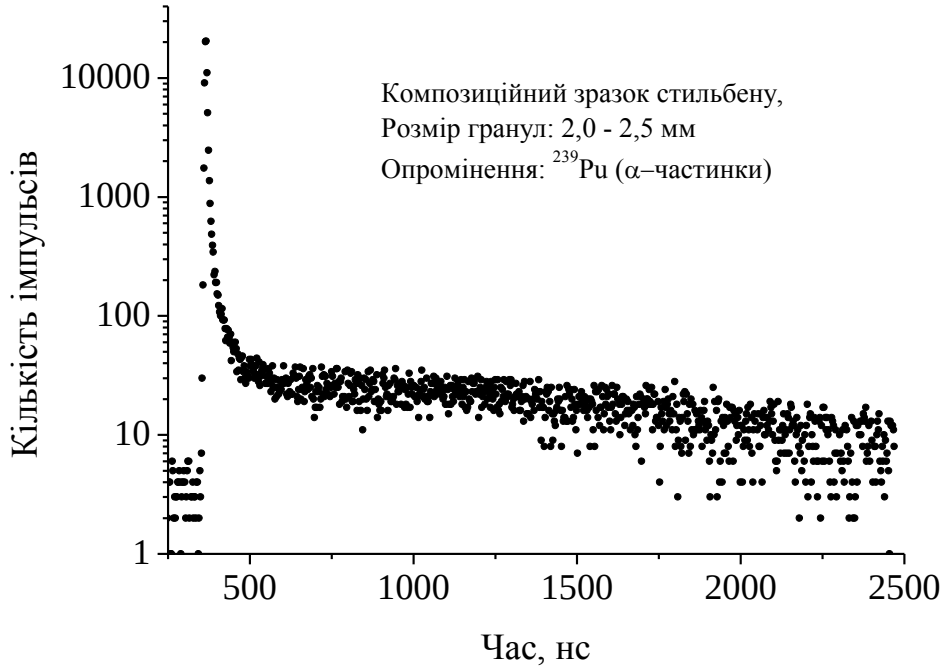

Рисунок 3.41. Форма імпульсу радіолюмінесценції композиційного сцинтилятора стильбену с розміром гранул *L* від 2,0 до 2,5 мм, який збуджується альфа-частинками джерела ^{239}Pu.

З рисунків 3.38-3.41 можна бачити, що для всіх досліджених зразків композиційних сцинтиляторів на кривих кінетики радіолюмінесценції окрім швидкого компонента сцинтиляційного імпульсу, який пов’язано з моноекспонентним висвітлюванням фотонів в $S_1 \rightarrow S_1$ переході, спостерігається також повільний компонент імпульсу, пов’язаний з більш повільним процесом триплет-триплетної аннігіляції. Процес Т-Т аннігіляції призводить до формування затриманої флуоресценції. Тобто отримані результати також підтверджуються ефективність процесів генерації, транспорту та рекомбінації триплетних станів в гетерогенних органічних матеріалах, які вивчаються.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання НДР «Гетероструктуровані органічні сцинтилятори із високою здатністю до розділення іонізуючих випромінювань за формою сцинтиляційного імпульсу для задач радіоекології» авторами (ІСМА) були отримані наступні результати:

1. Вирощено органічні монокристали на основі стильбену та *n*-терфенілу. Отримано зразки гетероструктурованих сцинтиляторів із різним розміром гранул на основі стильбену та *n*-терфенілу.
2. Проведено підбір та відпрацювання експериментальних методів дослідження світлового виходу, оптичного пропускання та форми імпульсу радіолюмінесценції органічних сцинтиляторів. Відпрацьовано експериментальні методи досліджень спектрів поглинання, миттєвої і затриманої флюоресценції, а також фосфоресценції органічних сцинтиляторів при кімнатній температурі та при температурі 77 K.
3. Проведені дослідження відносного світлового виходу та оптичного пропускання композиційних сцинтиляторів із різними фракціями розмірів гранул. Результати досліджень показали що для зразків із фракціями гранул <0,04; <0,06; 0,06–0,1 значення відносного світлового виходу та оптичного пропускання є дуже низькими.
4. Показано, що через відмінності механізмів формування миттєвої і затриманої флуоресценції, залежності інтенсивності світіння від розміру гранул суттєво відрізнялися для радіаційного збудження та збудження фотонами світла.
5. При постійному збудженні світлом в область поглинання триплетних екситонів:
   5.1. Виявлено пік, із енергією фотонів світла, яка відповідала енергії подвійній енергії триплетних екситонів ($2\varepsilon(T_1)$). Цей пік відповідає

енергія злиття двох T_1- станів (пряме світіння зі збудженого синглетного стану).

5.2. Спостерігався спектр флуоресценції, спектральний склад якого був аналогічний спектру миттєвої флуоресценції. За умовами експерименту збудження це можливе лише через злиття триплетних екситонів. Через заборону по мультиплетності, його інтенсивність досягала декількох відсотків від інтенсивності падаючого світла.

5.3. Найменше значення інтенсивності сповільненої флуоресценції I_D було отримано для монокристалів. Це пояснюється тим, що у цих об’єктах можливість «розбігання» T_1- станів від точки їх виникнення в об’ємі сцинтилятора, практично, нічим не обмежена. Найбільше значення I_D спостерігалося для композиційних сцинтиляторів, що містять гранули з розмірами меншими за 0,06 мм. Для композиційних сцинтиляторів, що містять гранули великих розмірів, зі збільшенням розмірів гранул, спостерігався розкид значень I_D, значення якого перевищувало тенденцію I_D до збільшення або до зменшення.

6. Для задач де необхідна висока здатність до розділення іонізуючих випромінювань за формою сцинтиляційного імпульсу, наприклад, для задач радіоекології, рекомендовано створення гетероструктурованих органічних сцинтиляторів (композиційних та полікристалічних) на основі гранул із розміром, що перевищують 0,3 мм.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

[1] The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Publication 103. *Annals of the ICRP*. – 2007. – Vol. 37. – pp.1–332. ISSN 0146-6453

[2] Галунов М.З. Радіолюмінесценція органічних конденсованих середовищ. Теорія та застосування (російською мовою) – видання друге, виправлене та доповнене / М.З. Галунов, В.П. Семиноженко - Київ: Наукова думка, 2015. – 464 с. ISBN 978-966-00-1469-5.

[3] Budakovsky S.V., Galunov N.Z., Karavaeva N.L. et al. *IEEE Trans. Nucl. Sci*. – 2007. – Vol. 54. – pp. 2734–2740. https://doi.org/10.1109/TNS.2007.910423

[4] Tarasenko O., Galunov N., Karavaeva. N., Lazarev I. *Radiat. Meas*. – 2013. – Vol. 58. – pp.61-65. https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2013.08.005

[5] Karavaeva N.L. *Problems of Atomic Science and Technology*, Ser.: Nuclear Physics Investigations. – 2014. – No.5 – pp. 91–97. ISSN 1562-6016

[6] Galunov N.Z., Karavaeva N.L. Tarasenko O.A. Pp.199 - 212 in book: Engineering of Scintillation Materials and Radiation Technologies, ed by Mikhail Korzik and Alexander Gektin, Springer Proceedings in Physics, Vol 200, 2017, 345 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68465-9_12

[7] Galunov N.Z., Khromiuk I.F., Tarasenko O.A. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A, 2020. – Vol. A 949, No.1 Article number 162870 (7 pages). https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.162870

[8] Galunov N., Gryn D., Karavaeva N. et. al. Journal of Luminescence 2020. – Vol. 226, (October 2020), paper number 117477 (12 pages). https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117477

[9] Zaitseva N., Glenn A., Carman L. et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A*. – 2015. – Vol. 789. – pp. 8–15. https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.03.090

[10] Galunov N.Z., Lazarev I.V., Martynenko E.V. et al. *Mol. Cryst. Liq. Cryst*. – 2015. – Vol. 616. pp. 176–186. https://doi.org/10.1080/15421406.2014.991105

[11] Пат. 106026 України, МПК[51] C30B 28/00 C30B 29/54 3/00 Спосіб виготовлення полікристалічного сцинтилятору на основі стильбену / Галунов М.З. Лазарєв І.В. Самохін А.Д; власник Інститут сцинтиляційних матеріалів. – № a201312050; заявл. 14.10.2013;опубл. 10.07.2014, Бюл. № 13.

[12] Сито лабораторное металлотканое СЛМ-120, Ø 120 мм: каталог товаров. Доступно за посиланням: https://labimpex.com.ua/p678758234-sito-laboratornoe-metallotkanoe.html

[13] Лазарев И.В. *Материаловедение*.– 2015. – № 4. с. 47–53. ISSN: 1684-579X.

[14] Мильман Ю.В., Галунов Н.З., Чугунова С.И. и др. Наносистеми, наноматеріали, нанотехології – 2016. – Т.14, №3. – сс. 461–476. ISSN: 1816 – 5230

[15] Boyaryntsev A.Yu., Galunov N.Z., Karavaeva N.L. et al. *Functional Materials*. – 2013. – Vol. 20. – pp. 471–476. http://dx.doi.org/10.15407/fm20.04.471

[16] Birks J.B. *The theory and practice of scintillation counting*. – London: Pergamon Press, 1967. – 662 p. ISBN: 9781483156064 1483156060

[17] Sysoeva E. P., Tarasov V.A., Zelenskaya O. V. *Nucl. Instrum. Meth.* – 2002. – Vol. 486A. – pp. 67–73. http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002(02)00676-9

[18] Photomultipliers. Catalog. Ruislip, UK: Electron Tubes Limited. – 2006. – 49 p. ISO 9001 Certificate ISO 14001 Certificate

[19] Baker J.H., Galunov N.Z., Seminozhenko V.P. et al. *Rad. Meas*. – 2007. – Vol. 42. – pp. 937–940. https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2007.02.044

[20] Galunov N.Z., Tarasenko O.A., Tarasov V.A. *Functional materials*. – 2013. – Vol. 20. – pp. 304–309. http://dx.doi.org/10.15407/fm20.03.304

[21]. Shimadzu UV-VIS spectrophotometers. UV-2450, UV-2550. Available: https://www.ssi.shimadzu.com/products/literature/spectroscopy/uv-24502550.pdf

[22] Baker J.H., Galunov N.Z., Stepanenko A.M., Tarasenko O.A. *Rad. Meas*. – 2004. Vol. 38. – pp. 817–820. http://dx.doi.org/10.1016/j.radmeas.2004.01.017

[23] The Dow Chemical Company, SYLGARD™ 184 Silicone Elastomer Kit: технічний опис. Доступно за посиланням: https://www.dow.com/documents/en-us/productdatasheet/11/11-31/11-3184-sylgard-184-elastomer.pdf

[24] В.М. Агранович, М.Д. Галанин. Перенос энергии электронного возбуждения в конденсированных средах М.: Наука. 1978. – 384с., С. 215. https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=483335

[25] М. Поуп, Ч. Свенберг. Электронные процессы в органических кристаллах. Т.1., М.: Мир. 1985. 544 с., С.174.

ПЕРЕЛІК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ПРОЄКТОМ

1. Khromiuk I.F., Galunov N.Z., Karavaeva N., L. Krech A.V., Polupan Ya.I, Tarasenko O.A. Heterostructured organic scintillators with a high pulse-shape discrimination capability for radioecology problems // *Problems of Atomic Science and Technology*, Ser.: Nuclear Physics Investigations. – 2021, Vol. 133, No. 3 – pp. 56-60. (Q4). https://doi.org/10.46813/2021-133-056.
2. .Khromiuk I., Galunov N., Karavaeva N., Krech A., Polupan Ya., Tarasenko O., Khabuseva S. Organic heterostructured scintillators with a high pulse shape discrimination capability // *Optical Materials: X*. (прийнято до публікації). (**Q2**)
3. Галунов М.З., Тарасенко О.А., Хромюк І.Ф.. Гетероструктуровані органічні сцинтилятори із високою здатністю до розділення іонізуючих випромінювань за формою сцинтиляційного імпульсу // Тези доповідей XIX конференції з фізики високих енергій та ядерної фізики, 23-26 березня 2021, Харків, Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут». – 2021. – С. 53. https://kipt.kharkov.ua/conferences/ihepnp/2021/tezis.pdf
4. Khromiuk I.F. Organic heterostructured scintillators with a high PSD capability for radioecological purposes // International workshop for young scientists "Functional materials for technical and biomedical applications". Hotel complex "Carnaval Resort & Spa" (village Koropovo, Zmiivsky district, Kharkiv region). September 06 – 10, 2021. – P. 10. https://drive.google.com/file/d/1pzQzWqq3KG423K_O3GEKUDc77ZVBlM1E/view?usp=sharing
5. Polupan Ya.I., Galunov N.Z., Lazariev I.V., Karavaeva N.L., Krech A.V., Khromiuk I.F. Investigation of the properties of polycrystalline scintillators obtained from grains grown from solution // International workshop for young scientists "Functional materials for technical and biomedical applications". Hotel complex "Carnaval Resort & Spa" (village Koropovo, Zmiivsky

district, Kharkiv region). September 06 – 10, 2021. – P. 12. https://drive.google.com/file/d/1pzQzWqq3KG423K_O3GEKUDc77ZVBlM1E/view?usp=sharing

6. Galunov N., Khromiuk I., Karavaeva N., Krech A., Polupan Ya., Tarasenko O., Khabuseva S. Organic heterostructured scintillators with a high pulse shape discrimination capability // 11th International Conference on Luminescent Detectors and Transformers of Ionizing Radiation, 12-17.09.2021, Bydgoszcz, Poland. – P. 27. https://www.lumdetr2021.pl/conf-data/LUMDETR2021/files/Book%20of%20Abstracts%20final%20.pdf

ДОДАТКИ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний інженер
Інституту сцинтиляційних
матеріалів Національної академії
наук України

_____ Бреславський І.А.
«12» липня 2021 р.

АКТ

про виготовлення експериментальних зразків в межах виконання наукової роботи за Проєктом «Гетероструктуровані органічні сцинтилятори із високою здатністю до розділення іонізуючих випромінювань за формою сцинтиляційного імпульсу для задач радіоекології»

(за договором № 186/01/0133 від 17.05.2021 р.)

Ми, що підписалися нижче, представники Інституту сцинтиляційних матеріалів НАН України, що входить до складу НТК "Інститут монокристалів" НАН України

Голова комісії – Галунов М.З. – завідувач відділу

Члени комісії – Караваєва Н.Л. – старший науковий співробітник,

– Лазарєв І.В. – науковий співробітник,

– Махота С.В. – провідний інженер-електронік

склали акт про те, що відповідно до технічного завдання наукової роботи за Проєктом «Гетероструктуровані органічні сцинтилятори із високою здатністю до розділення іонізуючих випромінювань за формою сцинтиляційного імпульсу для задач радіоекології» (за договором № 186/01/0133 від 17.05.2021 р.) виконавець (ІСМА НАНУ) виготовив серію експериментальних зразків:

- монокристал стильбену d=30 мм, h=5 мм, 1шт.;
- монокристал *п*-терфенілу d=30 мм, h=5 мм, 1шт.;
- монокристал *п*-терфенілу активованого 0,1 мас.% 1,4-дифеніл-1,3-бутадієну d=30 мм, h=5 мм, 1шт.;
- одношарові композиційні сцинтилятори стильбену 15х15 мм, із різним діапазоном розмірів гранул (<0,04 мм, <0,06 мм, 0,06–0,1 мм, 0,1–0,3 мм, 0,3–0,5 мм, 0,5–1,0 мм) по 1 шт. кожного. Разом 6 шт.;
- одношарові композиційні сцинтилятори *п*-терфенілу 15х15 мм, із різним діапазоном розмірів гранул (<0,04 мм, <0,06 мм, 0,06–0,1 мм, 0,1–0,3 мм, 0,3–0,5 мм, 0,5–1,0 мм) по 1 шт. кожного. Разом 6 шт.;

- одношарові композиційні сцинтилятори *n*-терфенілу активованого 0,1 мас.% 1,4-дифеніл-1,3-бутадієну 15х15 мм, із різним діапазоном розмірів гранул (<0,04 мм, <0,06 мм, 0,06–0,1 мм, 0,1–0,3 мм, 0,3–0,5 мм, 0,5–1,0 мм) по 1 шт. кожного. Разом 6 шт.;
- композиційні сцинтилятори стильбену розміром 20х20х20 мм, із різним діапазоном розмірів гранул (0,5–1,0 мм, 1,0–1,5 мм, 1,5–2,0 мм, 2,0–2,5 мм) по 1 шт. кожного. Разом 4 шт.;
- композиційні сцинтилятори *n*-терфенілу розміром 20х20х20 мм, із різним діапазоном розмірів гранул (0,5–1,0 мм, 1,0–1,5 мм, 1,5–2,0 мм, 2,0–2,5 мм) по 1 шт. кожного. Разом 4 шт.;
- полікристалічні сцинтилятори стильбену d=15 мм, h=1 мм, із різним діапазоном розмірів гранул (0,06–0,1 мм, 0,1–0,3 мм, 0,3–0,5 мм, 0,5–1,0 мм, 1,0–1,5 мм, 1,5–2,0 мм, 2,0–2,5 мм) по 1 шт. кожного. Разом 7 шт.;
- полікристалічні сцинтилятори *n*-терфенілу d=15 мм, h=1 мм, із різним діапазоном розмірів гранул (0,06–0,1 мм, 0,1–0,3 мм, 0,3–0,5 мм, 0,5–1,0 мм, 1,0–1,5 мм, 1,5–2,0 мм, 2,0–2,5 мм) по 1 шт. кожного. Разом 7 шт,;
- полікристалічні сцинтилятори *n*-терфенілу активованого 0,1 мас.% 1,4-дифеніл-1,3-бутадієну d=15 мм, h=1 мм, із різним діапазоном розмірів гранул (0,06–0,1 мм, 0,1–0,3 мм, 0,3–0,5 мм, 0,5–1,0 мм, 1,0–1,5 мм, 1,5–2,0 мм, 2,0–2,5 мм) по 1 шт. кожного. Разом 7 шт.

Експериментальні зразки будуть використані для проведення дослідницьких робіт, відповідно до календарного плану. Під час проведення досліджень зразки можуть бути зруйновані. Не зруйновані зразки можуть бути використані при дослідженнях у наступному етапі виконання Проєкту.

Голова комісії: М.З. Галунов

Члени комісії: Н.Л. Караваєва

І.В. Лазарєв

С.В. Махота

ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний інженер
Інституту сцинтиляційних
матеріалів Національної академії
наук України

_____ Бреславський І.А.
«_06_» _серпня_ 2021 р.

ПРОТОКОЛ ВИМІРЮВАНЬ

спектрів люмінесценції зразків органічних монокристалічних та композиційних сцинтиляторів в межах виконання НДР за проєктом

«Гетероструктуровані органічні сцинтилятори із високою здатністю до розділення іонізуючих випромінювань за формою сцинтиляційного імпульсу для задач радіоекології»

(за договором № 186/01/0133 від 17 травня 2021 р.)

1. Виконавець – Інституту сцинтиляційних матеріалів НАН України.

2. Місце проведення вимірювань – м. Харків, Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України.

3. Час проведення випробувань – 15 липня - 06 серпня 2021 р.

4. Основними завданнями робіт є визначення оптимального розміру кристалічних гранул для отримання ефективних композиційних сцинтиляторів на основі стильбену та *n*-терфенілу.

5. Метод проведення випробувань – вимірювання спектрів люмінесценції зразків органічних монокристалічних та композиційних сцинтиляторів вимірювалося на спектрофлуориметрі Cary Eclipse Fluorescence Spectrometer.

6. Результати вимірювань наведені у таблицях 1-12.

Таблиця 1. Інтенсивність люмінесценції I (%) одношарових композиційних сцинтиляторів стильбену на довжині хвилі люмінесценції $\lambda = 261$ нм відносно інтенсивності збудження люмінесценції на довжині хвилі $\lambda = 523$ нм ($I_{збуд} = 100\%$).

Зразок	Розмір гранул L, мм	I, %
Монокристал	–	3,46
Композиційний сцинтилятор	<0,04	0,82
–//–	<0,06	2,73
–//–	0,06–0,1	1,99
–//–	0,1–0,3	3,09
–//–	0,3–0,5	2,7
–//–	0,5–1,0	0,75

Таблиця 2. Інтенсивність люмінесценції I (%) одношарових композиційних сцинтиляторів стильбену на довжині хвилі люмінесценції $\lambda = 281$ нм відносно інтенсивності збудження люмінесценції на довжині хвилі $\lambda = 563$ нм ($I_{збуд} = 100\%$).

Зразок	Розмір гранул L, мм	I, %
Монокристал	–	5,58
Композиційний сцинтилятор	<0,04	1,9
–//–	<0,06	3,99
–//–	0,06–0,1	2,54
–//–	0,1–0,3	4,89
–//–	0,3–0,5	5,4
–//–	0,5–1,0	1,41

Таблиця 3. Інтенсивність піку затриманої флуоресценції I (%) одношарових композиційних сцинтиляторів стильбену відносно інтенсивності збудження люмінесценції на довжині хвилі λ = 523 нм ($I_{збуд}$ = 100%).

Зразок	Розмір гранул L, мм	I, %
Монокристал	–	0,57
Композиційний сцинтилятор	<0,04	1,9
–//–	<0,06	1,7
–//–	0,06–0,1	0,98
–//–	0,1–0,3	1,56
–//–	0,3–0,5	1,57
–//–	0,5–1,0	1,34

Таблиця 4. Інтенсивність піку затриманої флуоресценції I (%) одношарових композиційних сцинтиляторів стильбену відносно інтенсивності збудження люмінесценції на довжині хвилі λ = 563 нм ($I_{збуд}$ = 100%).

Зразок	Розмір гранул L, мм	I, %
Монокристал	–	0,55
Композиційний сцинтилятор	<0,04	1,77
–//–	<0,06	1,36
–//–	0,06–0,1	0,63
–//–	0,1–0,3	1,33
–//–	0,3–0,5	1,15
–//–	0,5–1,0	0,86

Таблиця 5. Інтенсивність люмінесценції I (%) одношарових композиційних сцинтиляторів n-терфенілу на довжині хвилі люмінесценції $\lambda = 248$ нм відносно інтенсивності збудження люмінесценції на довжині хвилі $\lambda = 496$ нм ($I_{збуд} = 100\%$).

Зразок	Розмір гранул L, мм	I, %
Монокристал	–	0,11
Композиційний сцинтилятор	<0,04	1,64
–//–	<0,06	1,61
–//–	0,06–0,1	1,06
–//–	0,1–0,3	2,58
–//–	0,3–0,5	2,53
–//–	0,5–1,0	1,37

Таблиця 6. Інтенсивність люмінесценції I (%) одношарових композиційних сцинтиляторів n-терфенілу на довжині хвилі люмінесценції $\lambda = 300$ нм відносно інтенсивності збудження люмінесценції на довжині хвилі $\lambda = 600$ нм ($I_{збуд} = 100\%$).

Зразок	Розмір гранул L, мм	I, %
Монокристал	–	0,33
Композиційний сцинтилятор	<0,04	3,58
–//–	<0,06	4,25
–//–	0,06–0,1	3,35
–//–	0,1–0,3	5,29
–//–	0,3–0,5	5,3
–//–	0,5–1,0	7,34

Таблиця 7. Інтенсивність піку затриманої флуоресценції I (%) одношарових композиційних сцинтиляторів *n*-терфенілу відносно інтенсивності збудження люмінесценції на довжині хвилі $\lambda = 496$ нм ($I_{збуд} = 100\%$).

Зразок	Розмір гранул L, мм	I, %
Монокристал	–	0,34
Композиційний сцинтилятор	<0,04	2,85
–//–	<0,06	3,17
–//–	0,06–0,1	2,95
–//–	0,1–0,3	2,95
–//–	0,3–0,5	3,33
–//–	0,5–1,0	1,98

Таблиця 8. Інтенсивність піку затриманої флуоресценції I (%) одношарових композиційних сцинтиляторів *n*-терфенілу відносно інтенсивності збудження люмінесценції на довжині хвилі $\lambda = 600$ нм ($I_{збуд} = 100\%$).

Зразок	Розмір гранул L, мм	I, %
Монокристал	–	0,6
Композиційний сцинтилятор	<0,04	2,1
–//–	<0,06	2,39
–//–	0,06–0,1	1,92
–//–	0,1–0,3	1,49
–//–	0,3–0,5	2,28
–//–	0,5–1,0	1,39

Таблиця 9. Інтенсивність люмінесценції I (%) одношарових композиційних сцинтиляторів *n*-терфенілу із 0,1 мас.% 1,4-дифеніл-1,3-бутадієну на довжині хвилі люмінесценції $\lambda = 248$ нм відносно інтенсивності збудження люмінесценції на довжині хвилі $\lambda = 496$ нм ($I_{збуд} = 100\%$).

Зразок	Розмір гранул L, мм	I, %
Монокристал	–	3,57
Композиційний сцинтилятор	<0,04	2,39
–//–	<0,06	2,47
–//–	0,06–0,1	1,06
–//–	0,1–0,3	0,75
–//–	0,3–0,5	0,42
–//–	0,5–1,0	0,75

Таблиця 10. Інтенсивність люмінесценції I (%) одношарових композиційних сцинтиляторів *n*-терфенілу із 0,1 мас.% 1,4-дифеніл-1,3-бутадієну на довжині хвилі люмінесценції $\lambda = 300$ нм відносно інтенсивності збудження люмінесценції на довжині хвилі $\lambda = 600$ нм ($I_{збуд} = 100\%$).

Зразок	Розмір гранул L, мм	I, %
Монокристал	–	5,84
Композиційний сцинтилятор	<0,04	4,53
–//–	<0,06	5,37
–//–	0,06–0,1	2,02
–//–	0,1–0,3	1,45
–//–	0,3–0,5	1,2
–//–	0,5–1,0	1,49

Таблиця 11. Інтенсивність піку затриманої флуоресценції I (%) одношарових композиційних сцинтиляторів *n*-терфенілу із 0,1 мас.% 1,4-дифеніл-1,3-бутадієну відносно інтенсивності збудження люмінесценції на довжині хвилі $\lambda = 496$ нм ($I_{збуд}$ = 100%).

Зразок	Розмір гранул L, мм	I, %
Монокристал	–	0,8
Композиційний сцинтилятор	<0,04	0,73
–//–	<0,06	3,52
–//–	0,06–0,1	2,34
–//–	0,1–0,3	3,22
–//–	0,3–0,5	2,02
–//–	0,5–1,0	2,72

Таблиця 12. Інтенсивність піку затриманої флуоресценції I (%) одношарових композиційних сцинтиляторів *n*-терфенілу із 0,1 мас.% 1,4-дифеніл-1,3-бутадієну відносно інтенсивності збудження люмінесценції на довжині хвилі $\lambda = 600$ нм ($I_{збуд}$ = 100%).

Зразок	Розмір гранул L, мм	I, %
Монокристал	–	0,65
Композиційний сцинтилятор	<0,04	0,52
–//–	<0,06	2,18
–//–	0,06–0,1	1
–//–	0,1–0,3	1,46
–//–	0,3–0,5	1,28
–//–	0,5–1,0	1,69

Науковий керівник: Галунов М.З.

Виконавці: Креч А.В.

Полупан Я.І.

Хромюк І.Ф.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний інженер
Інституту сцинтиляційних
матеріалів Національної академії
наук України

_____ Бреславський І.А.
«_06_» _серпня_ 2021 р.

ПРОТОКОЛ ВИМІРЮВАНЬ

відносного світлового виходу органічних монокристалічних та композиційних сцинтиляторів в межах виконання НДР за проєктом

«Гетероструктуровані органічні сцинтилятори із високою здатністю до розділення іонізуючих випромінювань за формою сцинтиляційного імпульсу для задач радіоекології»

(за договором № 186/01/0133 від 17 травня 2021 р.)

1. Виконавець – Інституту сцинтиляційних матеріалів НАН України.

2. Місце проведення вимірювань – м. Харків, Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України.

3. Час проведення випробувань – 15 липня – 06 серпня 2021 р.

4. Основними завданнями робіт є визначення оптимального розміру кристалічних гранул для отримання ефективних органічних композиційних сцинтиляторів.

5. Метод проведення випробувань – відносний світловий вихід визначався шляхом вимірювання амплітудних сцинтиляційних спектрів сцинтиляторів за допомогою фотоелектронного помножувача 9208A Electron Tubes Inc. та АЦП.

6. Результати вимірювань наведені у таблицях 1-3.

Таблиця 1. Відносний світловий вихід $LY_{відн}$ одношарових композиційних сцинтиляторів стильбену

Зразок	Розмір гранул L, мм	$LY_{відн}$, %*
Монокристал	–	100,0**
Композиційний сцинтилятор	<0,04	86,7
–//–	<0,06	115,2
–//–	0,06–0,1	70,7
–//–	0,1–0,3	90,3
–//–	0,3–0,5	92,1
–//–	0,5–1,0	102,4

* – Опромінювання: альфа-частинки з енергією 5,15 МеВ, джерело ^{239}Pu;

** – за 100 % приймався світловий вихід еталонного монокристалу.

Таблиця 2. Відносний світловий вихід $LY_{відн}$ одношарових композиційних сцинтиляторів *n*-терфенілу

Зразок	Розмір гранул L, мм	$LY_{відн}$, %*
Монокристал	–	100,0**
Композиційний сцинтилятор	<0,04	39,6
–//–	<0,06	79,1
–//–	0,06–0,1	58,3
–//–	0,1–0,3	70,6
–//–	0,3–0,5	73,9
–//–	0,5–1,0	84,9

* – Опромінювання: альфа-частинки з енергією 5,15 МеВ, джерело ^{239}Pu;

** – за 100 % приймався світловий вихід еталонного монокристалу.

Таблиця 3. Відносний світловий вихід $LY_{відн}$ одношарових композиційних сцинтиляторів *п*-терфенілу активованого 0,1 мас.% 1,4-дифеніл-1,3-бутадієну

Зразок	Розмір гранул L, мм	$LY_{відн}$, %*
Монокристал	–	100,0**
Композиційний сцинтилятор	<0,04	12,6
–//–	<0,06	80,6
–//–	0,06–0,1	25,1
–//–	0,1–0,3	60,5
–//–	0,3–0,5	63,2
–//–	0,5–1,0	84,5

* – Опромінювання: альфа-частинки з енергією 5,15 МеВ, джерело ^{239}Pu;

** – за 100 % приймався світловий вихід еталонного монокристалу.

Науковий керівник: Галунов М.З.

Виконавці: Тарасенко О.А.

Хромюк І.Ф.

Махота С.В.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний інженер
Інституту сцинтиляційних
матеріалів Національної академії
наук України

_____ Бреславський І.А.
«_06_» _серпня_ 2021 р.

ПРОТОКОЛ ВИМІРЮВАНЬ

оптичного пропускання зразків органічних монокристалічних та композиційних сцинтиляторів в межах виконання НДР за проєктом

«Гетероструктуровані органічні сцинтилятори із високою здатністю до розділення іонізуючих випромінювань за формою сцинтиляційного імпульсу для задач радіоекології»

(за договором № 186/01/0133 від 17 травня 2021 р.)

1. Виконавець – Інституту сцинтиляційних матеріалів НАН України.

2. Місце проведення вимірювань – м. Харків, Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України.

3. Час проведення випробувань – 15 липня - 06 серпня 2021 р.

4. Основними завданнями робіт є визначення оптимального розміру кристалічних гранул для отримання ефективних композиційних сцинтиляторів на основі стильбену та *n*-терфенілу.

5. Метод проведення випробувань – оптичне пропускання зразків органічних монокристалічних та композиційних сцинтиляторів вимірювалося на спектрофотометрі Shimadzu UV-2450.

6. Результати вимірювань наведені у таблицях 1-3.

Таблиця 1. Пропускання T (%) одношарових композиційних сцинтиляторів стильбену на довжині хвилі люмінесценції $\lambda = 400нм$

Зразок	Розмір гранул L, мм	T, %
Монокристал	–	74,8
Композиційний сцинтилятор	<0,04	48,7
–//–	<0,06	56,6
–//–	0,06–0,1	38,6
–//–	0,1–0,3	33,7
–//–	0,3–0,5	37,0
–//–	0,5–1,0	36,8

Таблиця 2. Пропускання T (%) одношарових композиційних сцинтиляторів *n*-терфенілу на довжині хвилі люмінесценції $\lambda = 400нм$

Зразок	Розмір гранул L, мм	T, %
Монокристал	–	37,0
Композиційний сцинтилятор	<0,04	47,7
–//–	<0,06	39,1
–//–	0,06–0,1	38,3
–//–	0,1–0,3	38,6
–//–	0,3–0,5	33,7
–//–	0,5–1,0	33,8

Таблиця 3. Пропускання T (%) одношарових композиційних сцинтиляторів n-терфенілу активованого 0,1 мас.% 1,4-дифеніл-1,3-бутадієну на довжині хвилі люмінесценції $\lambda = 400 нм$

Зразок	Розмір гранул L, мм	T, %
Монокристал	–	66,8
Композиційний сцинтилятор	<0,04	46,7
–//–	<0,06	47,3
–//–	0,06–0,1	13,3
–//–	0,1–0,3	29,7
–//–	0,3–0,5	35,5
–//–	0,5–1,0	39,6

Науковий керівник: Галунов М.З.

Виконавці: Міненко С.С.

Креч А.В.

Полупан Я.І.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заст. директора з наукової роботи
Інституту сцинтиляційних
матеріалів Національної академії
наук України

_____ Сорокін О.В.

«__10__» грудня 2021 р.

ПРОТОКОЛ ВИМІРЮВАНЬ

спектрів затриманої флуоресценції зразків органічних монокристалічних та полікристалічних сцинтиляторів в межах виконання НДР за проєктом **«Гетероструктуровані органічні сцинтилятори із високою здатністю до розділення іонізуючих випромінювань за формою сцинтиляційного імпульсу для задач радіоекології»**

(за договором № 186/01/0133 від 17 травня 2021 р)

1. Виконавець – Інституту сцинтиляційних матеріалів НАН України.

2. Місце проведення вимірювань – м. Харків, Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України.

3. Час проведення випробувань – 1 листопада – 3 грудня 2021 р.

4. Основними завданнями робіт є визначення оптимального розміру кристалічних гранул для отримання ефективних полікристалічних сцинтиляторів на основі стильбену, *n*-терфенілу та *n*-терфенілу, активованого 0,3 мас.% 1,4-дифеніл-1,3-бутадієну.

5. Метод проведення випробувань – вимірювання спектрів затриманої флуоресценції зразків органічних монокристалічних та полікристалічних сцинтиляторів вимірювалося на спектрофлуориметрі Cary Eclipse Fluorescence Spectrometer.

6. Результати вимірювань наведені у таблицях 1-6.

Таблиця 1. Інтенсивність піку затриманої флуоресценції I (%) полікристалічних сцинтиляторів стильбену відносно інтенсивності збудження люмінесценції на довжині хвилі $\lambda = 523$ нм ($I_{збуд} = 100\%$).

Зразок	Розмір гранул L, мм	I, %
Монокристал	–	0,57
Полікристалічний сцинтилятор	0,06–0,1	1,23
–//–	0,1–0,3	1,15
–//–	0,3–0,5	1,06
–//–	0,5–1,0	1
–//–	1,0–1,5	0,94
–//–	1,5–2,0	0,85
–//–	2,0–2,5	0,93

Таблиця 2. Інтенсивність піку затриманої флуоресценції I (%) полікристалічних сцинтиляторів стильбену відносно інтенсивності збудження люмінесценції на довжині хвилі $\lambda = 563$ нм ($I_{збуд} = 100\%$).

Зразок	Розмір гранул L, мм	I, %
Монокристал	–	0,55
Полікристалічний сцинтилятор	0,06–0,1	1,02
–//–	0,1–0,3	1,05
–//–	0,3–0,5	1,06
–//–	0,5–1,0	0,96
–//–	1,0–1,5	0,77
–//–	1,5–2,0	0,7
–//–	2,0–2,5	–

Таблиця 3. Інтенсивність піку затриманої флуоресценції I (%) полікристалічних сцинтиляторів n-терфенілу відносно інтенсивності збудження люмінесценції на довжині хвилі $\lambda = 496$ нм ($I_{збуд} = 100\%$).

Зразок	Розмір гранул L, мм	I, %
Монокристал	–	0,34
Полікристалічний сцинтилятор	0,06–0,1	3,73
–//–	0,1–0,3	2,8
–//–	0,3–0,5	2,14
–//–	0,5–1,0	2,75
–//–	1,0–1,5	2,31
–//–	1,5–2,0	2,1
–//–	2,0–2,5	2,7

Таблиця 4. Інтенсивність піку затриманої флуоресценції I (%) полікристалічних сцинтиляторів n-терфенілу відносно інтенсивності збудження люмінесценції на довжині хвилі $\lambda = 600$ нм ($I_{збуд} = 100\%$).

Зразок	Розмір гранул L, мм	I, %
Монокристал	–	0,6
Полікристалічний сцинтилятор	0,06–0,1	2,63
–//–	0,1–0,3	1,89
–//–	0,3–0,5	1,62
–//–	0,5–1,0	1,75
–//–	1,0–1,5	1,49
–//–	1,5–2,0	1,32
–//–	2,0–2,5	1,92

Таблиця 5. Інтенсивність піку затриманої флуоресценції I (%) полікристалічних сцинтиляторів *n*-терфенілу із 0,3 мас.% 1,4-дифеніл-1,3-бутадієну відносно інтенсивності збудження люмінесценції на довжині хвилі λ = 496 нм ($I_{збуд}$ = 100%).

Зразок	Розмір гранул L, мм	I, %
Монокристал	–	0,34
Полікристалічний сцинтилятор	0,06–0,1	2,53
–//–	0,1–0,3	2,09
–//–	0,3–0,5	2,86
–//–	0,5–1,0	3,01
–//–	1,0–1,5	3,17
–//–	1,5–2,0	2,16
–//–	2,0–2,5	2,58

Таблиця 6. Інтенсивність піку затриманої флуоресценції I (%) полікристалічних сцинтиляторів *n*-терфенілу із 0,3 мас.% 1,4-дифеніл-1,3-бутадієну відносно інтенсивності збудження люмінесценції на довжині хвилі λ = 600 нм ($I_{збуд}$ = 100%).

Зразок	Розмір гранул L, мм	I, %
Монокристал	–	0,65
Полікристалічний сцинтилятор	0,06–0,1	1,9
–//–	0,1–0,3	1,42
–//–	0,3–0,5	2,07
–//–	0,5–1,0	2,05
–//–	1,0–1,5	2,11
–//–	1,5–2,0	1,6
–//–	2,0–2,5	1,7

Науковий керівник: Тарасенко О.А.

Виконавці: Креч А.В.

Караваєва Н.Л.

Хромюк І.Ф.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заст. директора з наукової роботи
Інституту сцинтиляційних
матеріалів Національної академії
наук України

_____ Сорокін О.В.

«__10__» грудня 2021 р.

ПРОТОКОЛ ВИМІРЮВАНЬ

форми імпульсу радіолюмінесценції зразків композиційних сцинтиляторів стильбену в межах виконання НДР за проєктом

«Гетероструктуровані органічні сцинтилятори із високою здатністю до розділення іонізуючих випромінювань за формою сцинтиляційного імпульсу для задач радіоекології»

(за договором № 186/01/0133 від 17 травня 2021 р).

1. Виконавець – Інституту сцинтиляційних матеріалів НАН України.

2. Місце проведення вимірювань – м. Харків, Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України.

3. Час проведення випробувань – 1 листопада – 3 грудня 2021 р.

4. Основними завданнями робіт є вивчення повільного компоненту сцинтиляційного імпульсу для отримання ефективних органічних композиційних сцинтиляторів.

5. Метод проведення випробувань – однофотонний метод дослідження форми сцинтиляційного імпульсу.

6. Результати вимірів наведені на рисунках 1-4.

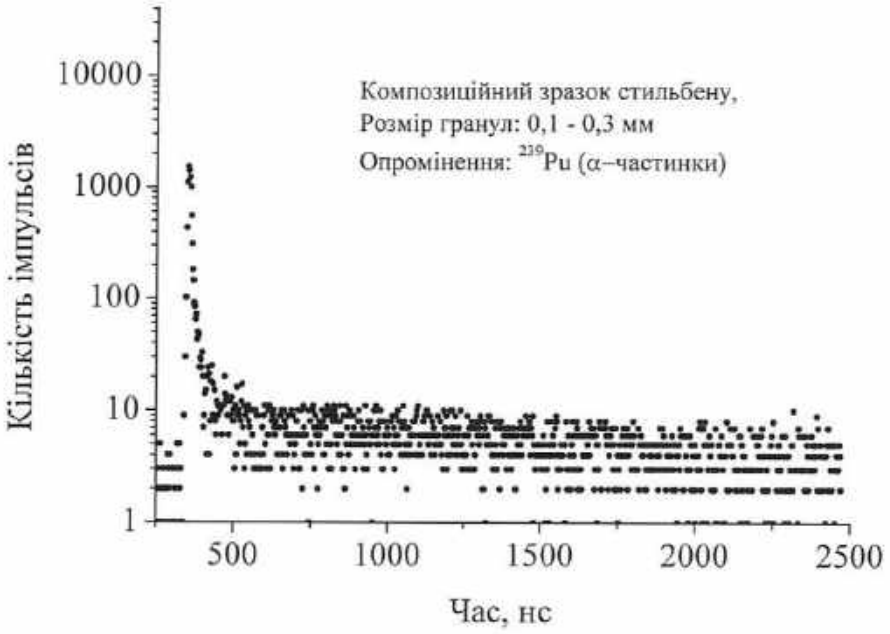

Рисунок 1. Форма імпульсу радіолюмінесценції композиційного сцинтилятора стильбену с розміром гранул L від 0,1 до 0,3 мм, який збуджується альфа-частинками джерела ^{239}Pu.

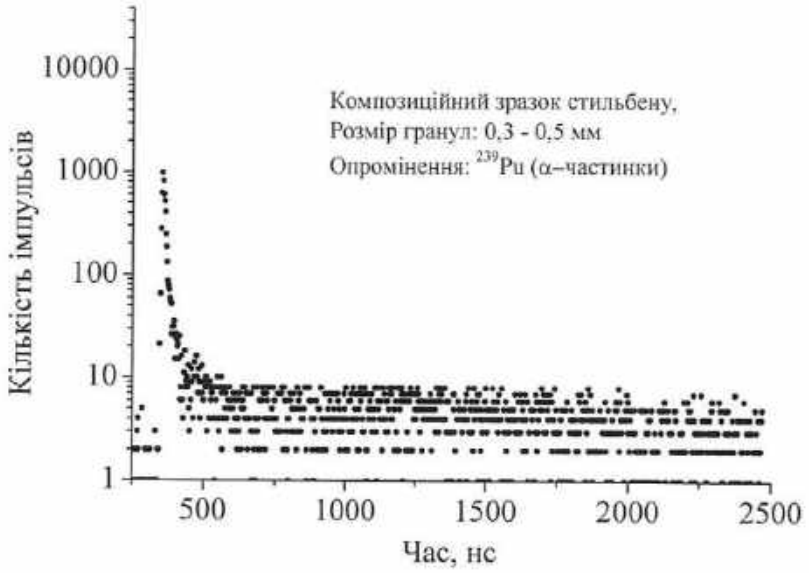

Рисунок 2. Форма імпульсу радіолюмінесценції композиційного сцинтилятора стильбену с розміром гранул L від 0,3 до 0,5 мм, який збуджується альфа-частинками джерела ^{239}Pu.

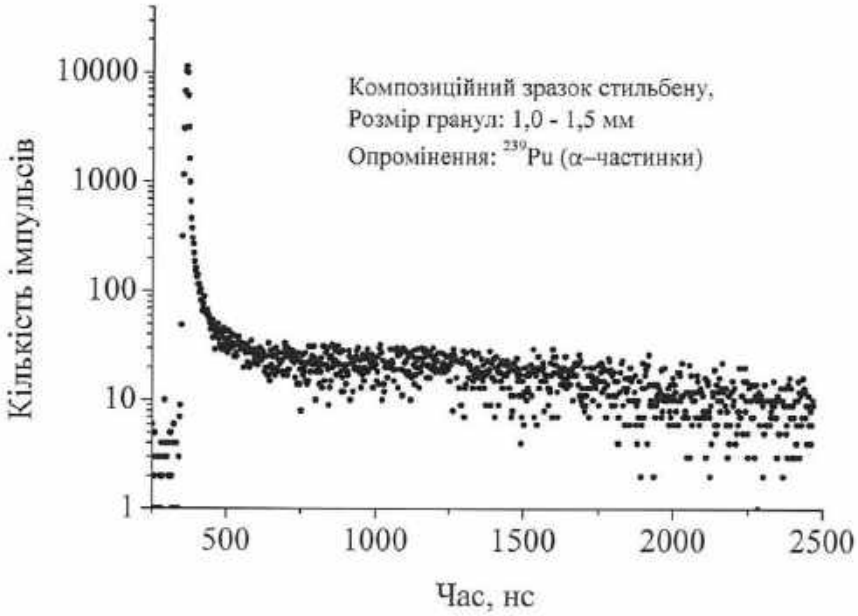

Рисунок 3. Форма імпульсу радіолюмінесценції композиційного сцинтилятора стильбену с розміром гранул L від 1,0 до 1,5 мм, який збуджується альфа-частинками джерела ^{239}Pu.

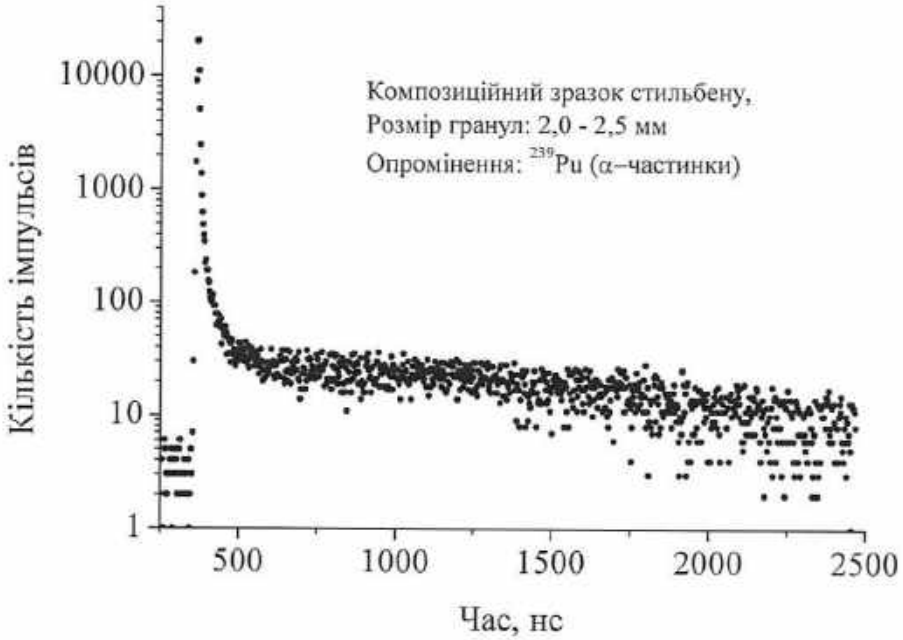

Рисунок 4. Форма імпульсу радіолюмінесценції композиційного сцинтилятора стильбену с розміром гранул L від 2,0 до 2,5 мм, який збуджується альфа-частинками джерела ^{239}Pu.

Науковий керівник: Тарасенко О.А.

Виконавці: Хромюк І.Ф.

Махота С.В.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заст. директора з наукової роботи
Інституту сцинтиляційних
матеріалів Національної академії
наук України

_____ Сорокін О.В.

«___10___» грудня 2021 р.

ПРОТОКОЛ ВИМІРЮВАНЬ

оптичного пропускання зразків органічних полікристалічних сцинтиляторів в межах виконання НДР за проєктом

«Гетероструктуровані органічні сцинтилятори із високою здатністю до розділення іонізуючих випромінювань за формою сцинтиляційного імпульсу для задач радіоекології»

(за договором № 186/01/0133 від 17 травня 2021 р).

1. Виконавець – Інституту сцинтиляційних матеріалів НАН України.

2. Місце проведення вимірювань – м. Харків, Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України.

3. Час проведення випробувань – 1 листопада – 3 грудня 2021 р.

4. Основними завданнями робіт є визначення оптимального розміру кристалічних гранул для отримання ефективних полікристалічних сцинтиляторів на основі стильбену, *n*-терфенілу та *n*-терфенілу, активованого 0,3 мас.% 1,4-дифеніл-1,3-бутадієну.

5. Метод проведення випробувань – оптичне пропускання зразків органічних полікристалічних сцинтиляторів вимірювалося на спектрофотометрі Shimadzu UV-2450.

6. Результати вимірювань наведені у таблицях 1-3.

Таблиця 1. Пропускання T (%) полікристалічних сцинтиляторів стильбену на довжині хвилі люмінесценції $\lambda = 390нм$

Зразок	Розмір гранул L, мм	T, %
Полікристалічний сцинтилятор	0,06–0,1	10,6
–//–	0,1–0,3	10,6
–//–	0,3–0,5	10,6
–//–	0,5–1,0	11,9
–//–	1,0–1,5	16,2
–//–	1,5–2,0	15,7
–//–	2,0–2,5	18,9

Таблиця 2. Пропускання T (%)полікристалічних сцинтиляторів n-терфенілу на довжині хвилі люмінесценції $\lambda = 390нм$

Зразок	Розмір гранул L, мм	T, %
Полікристалічний сцинтилятор	0,06–0,1	16,4
–//–	0,1–0,3	25,3
–//–	0,3–0,5	30,2
–//–	0,5–1,0	29
–//–	1,0–1,5	32,3
–//–	1,5–2,0	37,1
–//–	2,0–2,5	33,4

Таблиця 3. Пропускання T (%) полікристалічних сцинтиляторів n-терфенілу активованого 0,3 мас.% 1,4-дифеніл-1,3-бутадієну на довжині хвилі люмінесценції $\lambda = 390нм$

Зразок	Розмір гранул L, мм	T, %
Полікристалічний сцинтилятор	0,06–0,1	74,8
–//–	0,1–0,3	48,7
–//–	0,3–0,5	56,6
–//–	0,5–1,0	38,6
–//–	1,0–1,5	33,7
–//–	1,5–2,0	37,0
–//–	2,0–2,5	36,8

Науковий керівник: Тарасенко О.А.

Виконавці: Міненко С.С.

Лазарєв І.В.

Полупан Я.І.