

ВІДГУК
офіційного опонента на дисертаційну роботу
Онуфрієва Юрія Дмитровича

«Технологія виробництва радіаційностійких сцинтиляційних
детекторів для фізичних експериментів»

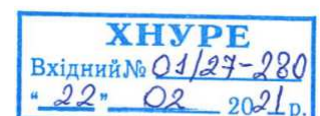
подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за
спеціальністю 05.27.06 – Технологія, обладнання та виробництво електронної
техніки

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

Сучасні фізичні експерименти на Великому адронному колайдері вимагають збільшити світність прискорювачів. При такій світності заряджені адрони надаватимуть безумовне пошкодження елементів і матеріалів детекторів, Тобто потрібна заміна окремих частин детекторів внаслідок радіаційного пошкодження матеріалів.

До детекторів для експериментів з фізики високих енергій можна виділити наступні вимоги: перекриття великих площ, швидкодія, висока стійкість до радіації. Як відомо, сцинтиляційні лічильники на основі пластмасового сцинтилятора є одними з основних детекторів в експериментах фізики високих енергій. Але сцинтиляційна пластмаса, яка використовується в адронних калориметрах компактного мюонного соленоїду (ЦЕРН, Швейцарія), особливо торцевому, що працюють в умовах надвеликих потоків іонізуючих випромінювань, має низьку радіаційну стійкість. Більш того, зі зростанням активації експериментальних установок залишається все менше можливостей для періодичної заміни та обслуговування елементів детекторів. Застосування кристалічних неорганічних сцинтиляторів, таких як оксиди або гранати, вирішує проблему радіаційної стійкості. Недоліком таких сцинтиляторів є перекриття великих площин за відсутності технологій вирощування великогабаритних монокристалів. Тому домінуючим фактором при виборі сцинтиляційного матеріалу є ціна таких детекторів.

В останній час у якості альтернативи розглядають композиційні сцинтилятори на основі гранул радіаційностійких монокристалів, введених в полімерну матрицю. Такі сцинтилятори успадковують властивості монокристалів, такі як радіаційна стійкість, часи загасання, люмінесценція. Але, як і монокристали, такі композиційні сцинтилятори не відрізняються дешевим виробництвом, тому що вимагають повного циклу вирощування монокристалів, що накладає обмеження на їх використання.



Таким чином, розробка технологічного забезпечення виробництва надійних радіаційностійких і недорогих сцинтиляційних елементів як компонентів систем детектування великих площ для фізичних експериментів є актуальним завданням.

Дослідження, результати яких викладені в дисертаційній роботі, виконувались відповідно до тематичних планів науково-дослідних робіт Інституту сцинтиляційних матеріалів НАН України в рамках держбюджетних тем «Інженерія детекторів на основі композиційних сцинтиляторів для фізики високих енергій» (2016 р., номер держреєстрації № 0116U002617), «Розробка методів отримання композитних сцинтиляторів» (2017-2021 рр., номер держреєстрації № 0117U000988), «Радіаційно-стійкі композиційні сцинтилятори та процеси, які визначають їх радіаційну стійкість» (2017-2019 рр., номер держреєстрації № 0117U001286), «Розроблення нових радіаційно-стійких матеріалів для експериментів з фізики високих енергій та потреб атомної галузі» (2019-2021 номер держреєстрації № 0119U101858), проекту «Розробка композиційних сцинтиляційних елементів для фізики високих енергій» (договір № ЦО-1-11, 2016-2017 рр., номер держреєстрації № 0116U006760) в рамках цільової програми співробітництва НАН України з ЦЕРН «Ядерна матерія в екстремальних умовах» на 2016-2017 рр., проекту «Розроблення сцинтиляційних модулів для фізики високих енергій» (договір № ЦО-1-19, номер держреєстрації № 0119U102069) в рамках цільової програми наукових досліджень НАН України «Фундаментальні дослідження з фізики високих енергій та ядерної фізики (міжнародна співпраця)» на 2018–2020 рр.

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень і висновків

У першому розділі автором виконано змістовний аналіз літературних джерел за темою роботи. Здійснено огляд вимог до сцинтиляційних детекторів для нової генерації калориметрів. Визначені неорганічні сцинтиляційні матеріали, які відповідають вимогам сучасних експериментів фізики високих енергій. Розглянуто обмеження на використання радіаційностійких монокристалів та композиційних сцинтиляторів на їх основі, що пов'язано з відсутності технологій вирощування великогабаритних монокристалів та використання коштовних тиглів.

У результаті проведеного аналізу сформульовано наукове завдання розробки сцинтиляційних детекторів на основі сцинтиляційних матеріалів, які отримано без стадії вирощування монокристалів та відповідають вимогам сучасних експериментів фізики високих енергій, та визначено основні напрямки дослідження.

У другому розділі досліджено характеристики отриманих сцинтиляційних матеріалів, що притаманні задачам дисертаційної роботи.

Отримання сцинтиляційних гранул оксидних сполук YSO:Ce та YAGG:Ce методом твердофазного синтезу є оптимальним за простотою та низькою вартістю. Визначено, що отримані сцинтиляційні матеріали витримують радіаційні навантаження до 100 Мрад. Для цих матеріалів, в залежності від дози опромінення, досліджено часи загасання, отримано спектри фото- та рентген люмінесценції та рівень відносного світлового виходу. Аналіз результатів визначив незначні зміни часів загасання та інтенсивності спектрів люмінесценції для отриманих зразків гранул YSO:Ce та YAGG:Ce після опромінення. А відносний світловий вихід становить 70% для YSO:Ce та 55% для YAGG:Ce від світлового виходу відповідних гранул до опромінення при накопичених дозах у 100Мрад. Таким чином, сцинтиляційні гранули YSO:Ce та YAGG:Ce, отримані методом твердофазного синтезу, є придатними сцинтиляційними матеріалами для створення радіаційностійких композиційних сцинтиляторів та для виготовлення радіаційностійких детекторів для використання в сучасних фізичних експериментах.

Третій розділ присвячено вирішенню основного завдання – досягнення максимально можливого коефіцієнту світлозбирання. Для вирішення цього завдання необхідно отримання максимально прозорих композиційних шарів, які складаються з оптично прозорої основи, в яку введено отримані сцинтиляційні гранули. Проведено математичне моделювання умов збирання світла методом Монте-Карло у композиційному шарі в залежності від його товщини, розміру та концентрації гранул, показників заломлення світла основи та сцинтиляційних гранул. Експериментально досліджено розповсюдження світла в композиційних шарах. Проведені експерименти і результати комп'ютерного моделювання дозволили визначити, що вплив на коефіцієнт оптичного пропускання композиційного шару мають відмінність показників заломлення світла основи і гранул, а на величину сцинтиляційного сигналу суттєво впливає відстань від точки виникнення сцинтиляційного спалаху до вихідної грані сцинтилятора, тобто тієї яка граничить із фотоприймачем.

Для покращення світлозбирання з композиційного шару на його вихідну поверхню запропоновано додати світлопровідний шар з оптично прозорого матеріалу. В якості оптичних середовищ, що відповідають основному критерію високої радіаційної стійкості, були досліджені полісилоксанові компаунди, кварцове скло, лейкосапфір. Ці матеріали не

втрачають своїх оптичних властивостей до накопичених доз в 100 Мрад в інтервалі довжини хвиль люмінесценції YSO:Ce та YAGG:Ce.

Визначено дизайни детекторів для роботи в різних умовах радіаційних навантажень.

Четвертий розділ присвячено розробці технології створення сцинтиляційного елемента на основі гранул YSO:Ce для радіаційно навантажених ділянок калориметрів, коли характеристики фотоприймача не відповідають умовам радіаційної стійкості і вимагають розташвання поза зоною радіаційних навантажень. Особливістю таких конструкцій є те, що в сцинтиляторі зроблено канавку, в яку розміщують спектрзміщуюче волокно для збирання світла.

Проведено математичне моделювання для визначення коефіцієнтів збирання світла, параметрів оптичних матеріалів світлопровідного шару та ширини канавки для розміщення спектрзміщуючого волокна в залежності від відстані місця сцинтиляційного спалаху у композиційному сцинтиляторі та спектрзміщуючим волокном.

Виготовлено сцинтиляційні елементи для роботи з віддаленим фотоприймачем, які містять гранули YSO:Ce з світлопровідним шаром на основі кварцового скла та з спектрзміщуючим волокном з монокристалу YAG:Ce або YAGG:Ce. Проведено опромінення зразків до накопиченої дози, коли пластмасовий сцинтилятор вже непридатний для використання. Досліджено оптичні та кінетичні властивості сцинтиляційного елемента з використанням монокристалічних кристалів YAG:Ce та YAGG:Ce в якості спектрзміщуючого волокна. Визначено, що сцинтиляційний елемент на основі композиційного сцинтилятору з використанням неорганічного спектрзміщуючого волокна має відносний світловий вихід майже вдвічі вище ніж існуючий сцинтиляційний елемент з пластмасового сцинтилятору з Y-11. Визначено, що використання спектрзміщуючого волокна на основі монокристалічного сцинтилятору YAGG:Ce дозволило отримати однорідність відносного світлового виходу на рівні 85%, в той час, як той же самий сцинтиляційний елемент зі стандартним спектрзміщуючим волокном на полістирольній основі Y-11 має однорідність світлового виходу на рівні 10%. Визначено, що радіаційна стійкість сцинтиляційного елемента на основі композиційного сцинтилятору з використанням неорганічного спектрзміщуючого волокна не менш ніж 20 Мрад.

П'ятий розділ присвячено розробці технології створення сцинтиляційного елемента на основі гранул YAGG:Ce або пластмасового сцинтилятору для радіаційно навантажених ділянок калориметрів, коли характеристики фотоприймача відповідають умовам радіаційної стійкості і

не вимагають розташування поза зоною радіаційних навантажень.

В концепції виготовлення композиційного сцинтилятора розроблено відбивач світла на основі порошку діоксиду титану TiO_2 , введеного в полісілоксанову основу, що витримує радіаційні навантаження до 100 Мрад без зміни відбиваючих властивостей. Може бути виготовлений великої площі, а також виконувати функцію як конструкційний матеріал при виготовленні детекторів великої площі.

Досліджено радіаційну стійкість сцинтиляційного елемента, які містять сцинтиляційні гранули $YAGG:Ce$. Ці елементи призначено для областей із радіаційними навантаженням близько 100 Мрад. Вони потребують менші витрати на виготовлення в порівнянні з монокристалом і складними монокристалічними елементами. Це дозволяє їх використовувати в середній частині калориметрів.

Запропоновано метод створення радіаційностійких сцинтиляційних детекторів великої площі на основі пластмасових сцинтиляторів.

Досліджено умови світлозбирання в залежності від способу отримання пластмасового сцинтилятора, Обробки його поверхонь та типу відбивача світла. Досліджено умови перетікання світла в суміжних сцинтиляційних елементах. Запропоновано методи формування різних типів відбивачів світла на поверхню багатоелементного сцинтиляційного детектору.

Досліджено міцність конструкції багатоелементного сцинтиляційного детекторів діапазоні температур від $-30^{\circ}C$ до $+60^{\circ}C$.

3. Наукова новизна результатів дисертаційної роботи та їх достовірність

При виконанні дисертаційної роботи отримані такі нові результати:

1. Вперше визначено рівень відносного світлового виходу сцинтиляційних гранул $YSO:Ce$ та $YAGG:Ce$, отриманих методом твердофазного синтезу, після опромінення електронами з енергією 8,3МеВ, який становить 60% для $YSO:Ce$ та 55% для $YAGG:Ce$ від світлового виходу відповідних гранул до опромінення при накопичених дозах у 100 Мрад, що забезпечує виготовлення радіаційностійких детекторів для використання в сучасних фізичних експериментах.

2. Отримав подальший розвиток метод виробництва композиційного шару з оптимальними розміром та концентрацією гранул $YSO:Ce$ або $YAGG:Ce$ в композиційному шарі, що на відміну від існуючих забезпечить відносний світловий вихід композиційного сцинтилятора, який складає 70% від відповідних монокристалів.

3. Удосконалено метод створення радіаційностійкого композиційного світловідбиваючого покриття, яке складається з порошку TiO_2 , концентрація якого становить 10-20ваг%, який введено в

радіаційностійку оптично прозору полісилоксанову основу, що забезпечує коефіцієнти відбивання 92-95% в діапазоні 400-800нм при радіаційних навантаженнях до 100 Мрад.

4. Вперше створено сцинтиляційні елементи, що містять гранули YSO:Ce або YAGG:Ce, з різними конструктивними особливостями, що забезпечують однорідність відносного світлового виходу не менш 85% та залишаються радіаційностійкими до доз опромінення у 100 Мрад.

5. Отримав подальший розвиток технологічний процес виробництва радіаційностійких сцинтиляційних детекторів великої площіні основі пластмасового або композиційного сцинтиляторів для різних радіаційних навантажень, що забезпечується шляхом удосконалення процесу формування світловідбиваючого покриття.

Практичне значення мають такі результати:

- доведено можливість використання гранул YSO:Ce та YAGG:Ce, отриманих методом твердофазного синтезу, для створення економічно ефективних радіаційностійких композиційних сцинтиляторів;

- розроблено та впроваджено технологічний процес виготовлення радіаційностійкого дифузного відбивача з коефіцієнтом відбивання 92-95% в діапазоні 400-800нм;

- розроблено та впроваджено технологічний процес створення сцинтиляційних елементів на основі гранул YSO:Ce з світлопровідним шаром з кварцового скла або лейкосапфіру для роботи з віддаленим фотоприймачем, коли світло з сцинтиляційного елемента збирається спектрозміщуючим волокном з монокристала YAGG:Ce;

- розроблено та впроваджено технологічний процес створення радіаційностійких сцинтиляційних елементів на основі гранул YAGG:Ce з світлопровідним шаром на основі полісилоксану та безпосереднім з'єднанням з фотоприймачем;

- розроблено та впроваджено технологічний процес створення багатоелементного сцинтиляційного детектора на основі пластмасових сцинтиляційних елементів з безпосереднім з'єднанням з фотоприймачем;

- розроблено та впроваджено технологічний процес створення багатоелементного сцинтиляційного детектора на основі радіаційностійких сцинтиляційних елементів на основі гранул YAGG:Ce з світлопровідним шаром на основі полісилоксану та з безпосереднім з'єднанням з фотоприймачем;

- отримані практичні результати дозволили здійснити постачання зразків багатоелементних сцинтиляційних детекторів на основі сцинтиляційних елементів з гранул неорганічних сцинтиляторів та пластмасових сцинтиляторів підприємствам у галузі фізики високих енергій (договір № О/55-16)

Результати, отримані в дисертаційній роботі, впроваджені в Інституті сцинтиляційних матеріалів НАН України (м. Харків, акт від 20.03.2020 р), а також у навчальний процес на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки ХНУРЕ (акт від 13.04.2020 р).

4. Зауваження по дисертаційній роботі

Позитивно оцінюючи в цілому виконану роботу, вважаю необхідним зробити деякі зауваження.

1 На сторінці 10 та сторінці 11 автореферату повторюється речення: «Проведений аналіз спектрів поглинання та люмінесценції радіаційно-стійких монокристалів дозволив визначити сцинтилятори YAGG:Ce або YAG:Ce, як такі, що мають суттєве перекриття спектру поглинання зі спектром емісії YSO:Ce (рис.8).»

2 В дисертаційній роботі для розробленого відбивача світла наведено чисельні значення коефіцієнтів відбивання у необхідному діапазоні довжин хвиль, та в авторефераті це не зазначено.

3 Чому однорідність світлового виходу вища для спектрозміщуючого волокна з монокристалу YAGG:Ce, ніж для органічного волокна Y-11?

4 В дисертації виготовлено сцинтиляційний детектор з 96 сцинтиляційних елементів. Але не вказано, які габаритні розміри цього детектору?

Проте зазначені недоліки та зауваження принципово не впливають на ступінь наукової новизни та практичного значення отриманих в дисертаційній роботі результатів. Висновки і положення, що зроблені автором та виносяться на захист, добре обґрунтовані, логічно впливають із отриманих результатів і відповідають поставленим меті і завданням дослідження.

5. Повнота викладених наукових положень та висновків

Матеріали дисертації опубліковано у 17 наукових працях, у тому числі 3 патенти України, 6 статей у наукових фахових виданнях України (серед них 3 реферовано в наукометричній базі Scopus), 8 тез доповідей у збірниках праць міжнародних науково-технічних конференцій.

Аналіз публікацій дозволяє зробити висновок, що основні результати дисертації знайшли повне відображення в наукових виданнях.

Автореферат у повній мірі відбиває основні положення та отриманні автором результати досліджень.

6. Загальний висновок

Дисертаційна робота Онуфрієва Юрія Дмитровича «Технологія виробництва радіаційно-стійких сцинтиляційних детекторів для фізичних експериментів» є науковим дослідженням, в якому вирішується важлива науково-технічна проблема. Дисертація відповідає вимогам пп. 9, 11, 12

«Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року № 567, щодо кандидатських дисертацій. На основі розглянутих матеріалів вважаю, що автор дисертаційної роботи, Онуфрієв Юрій Дмитрович, заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.06 –технологія, обладнання та виробництво електронної техніки.

Офіційний опонент,
Доктор технічних наук, професор,
Перший заступник Генерального
директора - головний конструктор ТОВ «Науково-виробниче

підприємство «ЛТУ»

В.М. Борщов

Підпис Борщова В.М. засвідчую:
Генеральний директор ТОВ «Науково-виробниче

підприємство «ЛТУ»



Г.І. Нікітський