

ВІДГУК

офіційного опонента

кандидата технічних наук, доцента, доцента кафедри автоматизації та інформаційних систем Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського МОН України

Когдася Максима Григоровича

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

Детальний аналіз дисертації Онуфрієва Ю.Д. «Технологія виробництва радіаційностійких сцинтиляційних детекторів для фізичних експериментів» дозволяє визначити наступні узагальнені висновки щодо актуальності, ступеня обґрунтованості основних наукових положень, висновків, рекомендацій, достовірності, наукової новизни, практичного значення, а також загальної оцінки роботи.

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

Вже перші роки експлуатації експериментальних установок на Великому адронному колайдері показали нагальну необхідність заміни окремих їх частин внаслідок радіаційного пошкодження елементів і матеріалів детекторів. Разом з тим, для виконання програми експериментів буде потрібно збільшити світність прискорювача - по 300 фбн^{-1} (зворотній фемтобарн - кількість частинок, які пройшли за час роботи машини через одиницю площі поперечного перерізу пучка в зоні зіткнення зустрічних пучків) в рік, починаючи з 2020 р, з тим, щоб до 2030 року світність досягла 3000 фбн^{-1} . При такій світності заряджені адрони надаватимуть безумовне пошкодження матеріалів.

Стосовно до детекторів для експериментів з фізики високих енергій можна виділити специфічні вимоги: перекриття великих площин, швидкодія, висока стійкість до радіації. Сцинтиляційні лічильники на основі пластмасового сцинтилятора, що є одним з основних матеріалів детекторів в експериментах фізики високих енергій, але має низьку радіаційну стійкість в умовах надвеликих потоків іонізуючих випромінювань. Більш того, зі зростанням активації експериментальних установок залишається все менше можливостей для періодичної заміни та обслуговування елементів детекторів,



що неминуче призводить до вимоги більш обґрунтованої оцінки ризиків втрати працездатності детекторів внаслідок їх радіаційного пошкодження. Проаналізовано, що проблема радіаційної стійкості може бути вирішена використанням кристалічних неорганічних сцинтиляторів, таких як силікати або гранати. Але основним обмеженням для перекриття великих площин є відсутність технологій вирощування великогабаритних монокристалів. Тому домінуючим фактором при виборі сцинтиляційного матеріалу є ціна таких детекторів.

Альтернативою можуть виступати композиційні сцинтилятори на основі гранул радіаційностійких монокристалів, введених в полімерну матрицю, яким останнім часом приділяється багато уваги. Такі сцинтилятори успадковують властивості монокристалів, такі як радіаційна стійкість, часи загасіння, люмінесценція. Але, як і монокристали, такі композиційні сцинтилятори не відрізняються дешевим виробництвом, тому що вимагають вирощування монокристалів, що накладає обмеження на їх використання.

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

Робота виконувалась 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. Коротка характеристика змісту роботи

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка відповідає паспорту спеціальності «технологія, обладнання та виробництво електронної техніки». Її текст складається із анотацій, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних літературних джерел (109 найменувань) і додатків. Основний зміст дисертації викладено на 143 сторінках друкованого тексту і містить 28 таблиць і 68 рисунків.

У вступі обґрунтовується актуальність теми досліджень, мета роботи і завдання, які необхідно вирішити для її досягнення, розглянута наукова і практична цінність отриманих результатів, наведено дані про апробацію роботи та публікації основних результатів.

Перший розділ присвячено огляду та аналізу вимог до сцинтиляційних детекторів для нової генерації калориметрів. На основі проведеного аналізу визначено, що сцинтиляційні детектори на основі органічних пластичних сцинтиляторів використовуються в більшості експериментів фізики високих енергій. Вони надійні і ефективні, прості в проектуванні і експлуатації, можуть бути легко відкалібровані і контролюватися, займають мало місця в сучасних спектрометричних установках і, в значній мірі, відповідають вимогам стабільності їх характеристик і радіаційної стійкості. Визначено неорганічні сцинтиляційні матеріали, які відповідають вимогам сучасних експериментів фізики високих енергій. Але дуже висока вартість таких сцинтиляційних матеріалів за відсутності технологій вирощування великогабаритних монокристалів та використання коштовних тиглів обмежують їх використання в експериментах. Проведений аналіз дозволив визначити концепцію розробки сцинтиляційних детекторів для відповідності вимогам сучасних експериментів фізики високих енергій та сформулювати основні напрямки дослідження.

У другому розділі наведено основні деталі отримання сцинтиляційних матеріалів та методи їх характеристизації.

За аналізом методів синтезу оксидних сполук визначено, що за простотою та низькою вартістю метод твердофазного синтезу є оптимальним для отримання сцинтиляційних гранул YSO:Ce та YAGG:Ce. За зміною часів загасання та спектрами фото- та рентгенлюмінесценції в залежності від дози опромінення визначено, що отримані сцинтиляційні матеріали витримують радіаційні навантаження до 100Мрад. Рівень відносного світлового виходу отриманих зразків гранул YSO:Ce та YAGG:Ce після опромінення становить 70% для YSO:Ce та 55% для YAGG:Ce від світлового виходу відповідних гранул до опромінення при накопичених дозах у 100Мрад. За результатами досліджень визначено, що 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.

У третьому розділі досліджено умови створення максимально прозорих композиційних сцинтиляторів, тобто забезпечення максимально можливого коефіцієнту світлозбирання. Для розв'язання цієї задачі, спочатку було проведено математичне моделювання умов збирання світла методом Монте-Карло у композиційному сцинтиляторі в залежності від розміру та концентрації гранул, товщини композиційного сцинтилятора та показників заломлення світла його складових. Отримані результати було перевірено у експериментах із розповсюдження світла в композиційних сцинтиляторах.

Відношення показників заломлення світла матеріалів основи сцинтилятора і гранул, що вона містить, грає ключову роль при створенні композиційного сцинтилятора. Це відношення вносить найбільший вклад в оптичне пропускання зразків на довжині хвилі люмінесценції гранул.

Для покращення світлозбирання з композиційного шару на його вихідну поверхню запропоновано додати світлопровідний шар з оптично прозорого матеріалу. В якості оптичних середовищ були досліджені полісилоксанові компаунди, кварцове скло, лейко сапфір, як такі, що відповідають основному критерію високої радіаційної стійкості без втрати своїх оптичних властивостей до накопичених доз в 100Мрад в інтервалі довжини хвиль люмінесценції YSO:Ce та YAGG:Ce.

Четвертий розділ присвячено конструктивним та технологічним рішенням створення сцинтиляційного елемента на основі гранул YSO:Ce для радіаційно навантажених ділянок калориметрів, коли фотоприймач повинен бути поза зоною радіаційних навантажень, тобто його характеристики не відповідають умовам радіаційної стійкості. Особливістю таких конструкцій є те, що в сцинтиляторі зроблено канавку, в яку розміщують спектрозміщуюче волокно для збирання світла.

Математичне моделювання дозволило визначити:

а) коефіцієнти збирання світла в залежності від відстані місця сцинтиляційного спалаху у композиційному сцинтиляторі та спектрозміщуючим волокном;

б) залежність параметрів оптичних матеріалів світлопровідного шару та ширини канавки для розміщення спектрозміщуючого волокна на світлозбирання.

Виготовлено прототипи сцинтиляційних елементів для роботи з віддаленим фотоприймачем, які містять гранули YSO:Ce з світлопровідним

шаром на основі кварцового скла та з спектрозміщуючим волокном з монокристалу YAG:Ce або YAGG:Ce. Зразки було опромінено до дози у 20Мрад. Відносний світловий вихід сцинтиляційних елементів на основі композиційного сцинтилятора з гранул YSO:Ce, світлопровідного шару з кварцового скла та з спектрозміщуючим волокном з монокристалу YAG:Ce, зменшився на 2-5%. Подальші дослідження радіаційної стійкості сцинтиляційного елементу на основі композиційного сцинтилятора з гранул YSO:Ce з світлопровідним шаром з кварцового скла та спектрозміщуючим волокном YAGG:Ce визначили можливість роботи до накопиченої дози у 50Мрад і більше. Дослідження неоднорідності відносного світлового виходу по площині сцинтиляційного елементу в залежності від типу спектрозміщуючого волокна. Використання волокна YAGG:Ce у складі сцинтиляційного елементу дозволило отримати неоднорідність у 15%.

Таким чином створено сцинтиляційні елементи, що мають радіаційну стійкість не менше 50Мрад і економічну ефективність, яка дозволяє замінити сцинтиляційну пластмасу в частинах калориметру, де радіаційні навантаження будуть більше 5Мрад.

У п'ятому розділі описано конструктивні та технологічні рішення створення сцинтиляційних детекторів великої площі на основі радіаційностійких сцинтиляційних елементів з безпосереднім з'єднанням з фотоприймачем для роботи в зоні радіаційних навантажень.

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

Наступними за радіаційною стійкістю, є композиційні сцинтиляційні елементи, які містять монокристалічні гранули. Ці елементи призначені для областей із радіаційними навантаженням близько 100 Мрад. Вони потребують менші витрати на виготовлення в порівнянні з монокристалами і складними монокристалічними елементами. Це дозволяє їх використовувати в середній частині калориметрів, які вже мають значні площі.

Запропоновано метод створення радіаційностійких сцинтиляційних детекторів великої площі на основі композиційних або пластмасових сцинтиляторів за рахунок конструкторсько-технологічного забезпечення виробництва сцинтиляційних елементів, які безпосередньо з'єднуються з фотоприймачем, що відповідають умовам сучасних фізичних експериментів.

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 8,3MeV, який становить 60% для YSO:Ce та 55% для YAGG:Ce від світлового виходу відповідних гранул до опромінення при накопичених дозах у 100Мрад, 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%, введеного в радіаційностійку оптично прозору полісілоксанову основу, що забезпечує коефіцієнти відбивання 92-95% в діапазоні 400-800нм при радіаційних навантаженнях до 100Мрад.

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 100Мрад.

5. Отримав подальший розвиток технологічний процес виробництва радіаційностійких сцинтиляційних детекторів великої площі на 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 елементу 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. В роботі розглядається радіаційна стійкість композиційних шарів. При цьому не наведено як змінюється прозорість композиційного шару під впливом радіації.

2. В дисертаційній роботі розроблено радіаційностійкий відбивач світла, в якому пігментом виступає TiO_2 . Чи розглядалися інші матеріали в якості пігментів?

3. Чому для сцинтиляційного елементу з віддаленим фотоприймачем не досліджено механічну міцність?

4. На сторінках 10 та 11 автореферату дублюється текст: «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).»

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.

4. 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.

5. Загальний висновок

Дисертаційна робота Онуфрієва Юрія Дмитровича «Технологія виробництва радіаційностійких 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,
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації
та інформаційних систем
Кременчуцького національного університету
ім. Михайла Остроградського МОН України



М.Г. Когдась

