

ВІДГУК

офіційного опонента

кандидата технічних наук, доцента кафедри автоматизації та інформаційних систем Кременчуцького національного університету

ім. Михайла Остроградського МОН України

Когдася Максима Григоровича

на дисертаційну роботу

Непокупної Тетяни Анатоліївни

«Технологія виробництва комбінованих детекторів іонізуючого випромінювання»

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

Детальний аналіз дисертації Непокупної Т.А. «Технологія виробництва комбінованих детекторів іонізуючого випромінювання» дозволяє визначити наступні узагальнені висновки щодо актуальності, ступеня обґрунтованості основних наукових положень, висновків, рекомендацій, достовірності, наукової новизни, практичного значення, а також загальної оцінки роботи.

Актуальність теми дисертаційної роботи

Для визначення джерел іонізуючого випромінювання з низькою активністю необхідні високочутливі сцинтиляційні детектори. В даний час для вирішення цього завдання використовують радіометричні прилади з декількох детекторів, або на основі багат шарових детекторів. Альтернативою існуючим рішенням є комбіновані детектори на основі сцинтиляційного сендвічу, що складається з сцинтиляційного та світлопровідного шарів з неорганічних та органічних матеріалів. Комбіновані детектори можуть використовуватися в портальних системах як гамма-канал, в радіометрах для визначення малих потоків альфа-



та бета-частинок, а також в доглядових рентгенівських системах. Для усіх зазначених систем необхідні детектори з високою чутливістю реєстрації іонізуючого випромінювання.

У радіаційних портальних моніторах (РПМ) для реєстрації фотонів гамма-випромінювання найчастіше використовують великогабаритні детектори на основі монокристалів NaI:Tl та сцинтиляційна пластмаса – полівінілтолуол або полістирол. Чутливість РПМ на основі сцинтиляційної пластмаси вища, ніж у РПМ, до складу яких входять детектори NaI:Tl, що пов'язано з великою площею робочої поверхні сцинтиляційної пластмаси. Для реєстрації надмалих доз альфа- та бета-частинок використовують комерційні детектори на основі порошкоподібного люмінофору ZnS:Ag, нанесеного на сцинтиляційну пластмасу. Дані детектори є дуже затребуваними в системах, що використовуються на атомних електростанціях, для приладів, що визначають концентрації альфа-радіонуклідів у воді та навколишніх матеріалах. Недоліком таких детекторів є енергетичне розділення більше 40% при визначенні альфа-частинок та висока фосфоресценція ZnS:Ag. Також є потреба у плоскпанельних детекторах для рентгенівської візуалізації рентгенографії з просторовим розділенням від 3,5 пар ліній/мм. Для виготовлення детекторів для цифрової медичної радіографії необхідні недорогі сцинтиляційні матеріали замість коштовних колончатих структур CsI:Tl та кераміки Gd₂O₂S:Tb.

Таким чином, на сьогоднішній день розробка нових технологій, які забезпечать виготовлення високочутливих детекторів великої площі для приладів радіаційного контролю, є актуальним завданням.

Результати досліджень, які викладені в дисертаційній роботі, були отримані відповідно до тематичних планів науково-дослідних робіт Інституту сцинтиляційних матеріалів НАН України в рамках держбюджетних тем: «Розробка методів отримання композитних сцинтиляторів» (2017–2021 рр., номер держреєстрації № 0117U000988), науково-дослідного проекту «Нові

сцинтиляційні композиційні детектори для медичної рентгенівської діагностики» (договір № Ф79/125-2017, договір № Ф-79/57-2018, 2017-2018 рр., номер держреєстрації № 0118U001505), інноваційного проекту НАН України «Розроблення детекторів для реєстрації альфа- та альфа-бета випромінювань» (2020 р., номер держреєстрації № 012U100629).

Ступінь обґрунтованості наукових положень і висновків

У першому розділі автором проведено огляд стану досліджень в галузі виробництва детектуючих систем для реєстрації фотонів гамма- та рентгенівських квантів, а також альфа- та бета-частинок, що відносяться до теми роботи. Аналіз сучасних розробок детекторів, що реєструють малі потоки іонізуючого випромінювання, дозволив сформулювати основні вимоги, яким вони мають відповідати. Визначені вимоги до сцинтиляційних матеріалів для виготовлення високочутливих детекторів іонізуючого випромінювання. Встановлені обмеження, що не дозволяють до кінця вирішити завдання виготовлення високочутливих детекторів альфа-, бета-частинок, а також фотонів гамма- та низькоенергетичних рентгенівських квантів. На основі проведеного аналізу сформульовано наукове завдання підвищення чутливості реєстрації сцинтиляційних детекторів альфа-, бета-частинок і фотонів гамма-випромінювання, а також просторового розділення детекторів для реєстрації фотонів низькоенергетичних рентгенівських квантів шляхом розробки технології виробництва комбінованих детекторів на основі органічних та неорганічних матеріалів, а також визначено основні напрямки дослідження.

У другому розділі розроблено технологічні процеси виробництва сцинтиляційного сендвічу комбінованих детекторів з площею вхідної поверхні від 1000 см^2 на основі, який складається зі сцинтиляційного та світлопровідного шару з матеріалів, що відрізняються за лінійними коефіцієнтами теплового розширення у 4,5 – 7 разів. Запропоновано конструкторсько-технологічне забезпечення виготовлення сцинтиляційних сендвічів, яке дозволяє виготовляти комбіновані

детектори великої площі зі стабільними сцинтиляційними характеристиками при температурах від -50°C до $+70^{\circ}\text{C}$. Результати проведених розрахунків підтверджено експериментальними даними.

Завдання виробництва комбінованих детекторів з площею вхідної поверхні від 1000 см^2 вирішено шляхом розробки технологічних процесів виготовлення сцинтиляційних шарів сендвіча детектора у вигляді мозаїки з кристалічних пластин або у вигляді композиційних сцинтиляторів з гранул, отриманих твердофазним синтезом, або з кристалічних гранул.

Визначено загальні умови, що мінімізують дотичні напруження в шарі полісилоксанового клею, що з'єднує шари сендвіча комбінованого детектору на основі кристалічних пластин NaI:Tl і сцинтиляційного полістиролу.

Визначені оптимальні умови збирання світла шляхом математичного моделювання умов збирання світла у композиційних шарах в залежності від їх товщини, розміру гранул та показників заломлення гранул та оптичної основи. За результатами симуляцій визначені умови збільшення прозорості композиційних шарів та сформульовані умови для розробки технологічних процесів виготовлення комбінованих детекторів іонізуючого випромінювання великої площі.

Удосконалено технологічні операції виробництва сцинтиляційних гранул GAGG:Ce та CsI:Tl та виготовлення сцинтиляційних композиційних шарів, в результаті чого підвищено чутливості реєстрації комбінованих детекторів для реєстрації фотонів гамма-випромінювання, та збільшено просторове розділення детекторів фотонів низькоенергетичних рентгенівських квантів (для візуалізації об'єктів).

Третій розділ присвячено розробці технологічних процесів виробництва комбінованих детекторів для реєстрації фотонів гамма-випромінювання з площею вхідної поверхні від 1000 см^2 для роботи в при температурах від -50°C до $+70^{\circ}\text{C}$. Детектори складаються зі сцинтиляційного сендвіча на основі кристалічних шарів NaI:Tl або композиційних сцинтиляторів CsI:Tl та сцинтиляційного полістиролу.

Розроблена технологія виробництва дозволяє виготовляти лічильні та спектрометричні детектори для реєстрації фотонів гамма-випромінювання в діапазоні енергій 20 – 2000 кеВ.

Встановлені перспективи об'єднання сцинтиляційних шарів NaI:Tl та полістиролу в одному високоефективному детекторі для реєстрації фотонів гамма-квантів шляхом математичного моделювання сцинтиляційних процесів методом Монте Карло. Встановлено, що даний комбінований детектор поєднує спектрометрію та високу чутливість реєстрації фотонів гамма-квантів у діапазоні енергій 20 – 3000 кеВ. Встановлено, що відносна ефективність реєстрації комбінованого детектора на основі NaI:Tl та полістиролу для енергій 20 – 150 кеВ удвічі вище, ніж у детектора NaI:Tl та в 4 рази вище, ніж у полістиролу еквівалентного об'єму, відповідно. Підвищена ефективність є результатом виникнення в шарі полістиролу гамма-квантів зворотного розсіювання, які далі реєструє шар NaI:Tl. Розраховано, що кількість таких подій дорівнює ~20%.

Розроблені технологічні операції дозволили виготовити комбіновані детектори з чутливістю реєстрації фотонів гамма-квантів на 30–80% більше, ніж у детекторів на основі монокристалу NaI:Tl або сцинтиляційного полістиролу еквівалентного об'єму. Енергетичне розділення комбінованого детектору на основі NaI:Tl та сцинтиляційного полістиролу з площею вхідної поверхні 1000 см² не перевищує 8,5% під час опромінення ¹³⁷Cs.

Четвертий розділ присвячено розробці технологічних процесів виготовлення спектрометричних комбінованих детекторів для реєстрації альфа- та бета-частинок. Розроблені детектори мають площу вхідної поверхні до 180 см² та складаються зі сцинтиляційного сендвіча на основі гетерогенного сцинтиляційного шару ZnSe:Al та світлопровідного шару з поліметилметакрилату. Запропоновано та розроблено технологічний процес виготовлення гетерогенного шару з гранул ZnSe:Al, який складається з альфа-чутливого та бета-чутливого підшарів, який забезпечує одночасну реєстрацію та високу чутливість реєстрації

альфа- та бета- частинок. При розробці складу та товщини гетерогенного шару ZnSe:Al було враховано довжини пробігу альфа- та бета-частинок у ZnSe:Al та умови збирання світла в гетерогенних композиційних шарах, що мають низьку прозорість. Стабільність функціональних параметрів розроблених детекторів альфа- та бета-частинок підтверджена результатами температурних випробувань при -50°C та $+70^{\circ}\text{C}$.

В результаті роботи виготовлені комбіновані детектори на основі гетерогенних шарів ZnSe:Al з роздільною реєстрацією альфа- та бета частинок та чутливістю реєстрації альфа-частинок на 26% більше та бета-частинок на 14% більше, ніж у детекторів на основі люмінофору ZnS:Ag, нанесеного на сцинтиляційну пластмасу

П'ятий розділ присвячено розробленню технологічних процесів виготовлення комбінованих детекторів для реєстрації фотонів низькоенергетичних рентгенівських квантів (для візуалізації об'єктів) з площею входної поверхні до 400 см^2 . Розроблені детектори складаються зі сцинтиляційного сендвіча на основі композиційного шару з гранул GAGG:Ce або CsI:Tl та волоконно-оптичної пластини.

Завдання підвищення просторового розділення комбінованих детекторів для рентгенівської візуалізації вирішено шляхом оптимізації активатора в складі гранул GAGG:Ce, а також за рахунок зменшення різниці показників заломлення сцинтиляційних гранул та оптичної основи, які були використані для виробництва сцинтиляційного шару комбінованого детектору. Показана стабільність функціональних параметрів складових елементів комбінованих детекторів для реєстрації фотонів низькоенергетичних рентгенівських квантів при температурах від -50°C до $+70^{\circ}\text{C}$.

Проведені дослідження стали основою для розроблення операції технологічного процесу виготовлення комбінованих детекторів для рентгенівської візуалізації з просторовим розділенням на 25% краще, ніж у комерційних

плоскопанельних детекторів з матрицею на тонкошарових транзисторах на основі екранів CsI:Tl та Gd₂O₂S:Tb.

Наукова новизна результатів дисертаційної роботи та їх достовірність

При виконанні дисертаційної роботи отримані такі нові результати:

1. Вперше запропоновано технологію виробництва складових елементів комбінованих детекторів для реєстрації фотонів гамма-випромінювання з площею вхідної поверхні від 1000 см² на основі оптично з'єднаних неорганічних та органічних матеріалів, що відрізняються за лінійними коефіцієнтами теплового розширення у 4,5–7 разів, яка забезпечує стабільність функціональних параметрів детекторів у температурному інтервалі від -50°C до +70°C.

2. Набув подальшого розвитку технологічний процес виготовлення лічильних комбінованих детекторів для реєстрації фотонів гамма-випромінювання з площею вхідної поверхні від 1000 см², які складаються з монокристалічних пластин NaI:Tl або композиційних сцинтиляторів CsI:Tl, оптично з'єднаних з пластиною сцинтиляційного полістиролу, що забезпечує більшу на 30–80% чутливість реєстрації фотонів гамма-квантів з енергією 20–3000 кеВ, порівняно з детекторами на основі монокристалу NaI:Tl або сцинтиляційного полістиролу.

3. Вперше розроблено технологічний процес виробництва спектрометричних комбінованих детекторів для реєстрації фотонів гамма-випромінювання з площею вхідної поверхні від 1000 см² на основі кристалічних пластин NaI:Tl та пластини сцинтиляційного полістиролу, який забезпечує ідентифікацію радіонуклідів за рахунок наявності в спектрі амплітуд імпульсів детекторів піку повного поглинання від NaI:Tl та додаткового піку зворотного розсіювання в NaI:Tl та в сцинтиляційному полістиролі. Енергетичне розділення комбінованого детектора від колімованого джерела ¹³⁷Cs не перевищує 8,5% (E_γ=662 кеВ).

4. Удосконалено технологічний процес виготовлення комбінованих детекторів альфа- та бета-частинок з площею вхідної поверхні до 180 см² на основі гетерогенних шарів ZnSe:Al, який забезпечує спектрометрію та чутливість

реєстрації альфа-частинок від джерела ^{239}Pu на 26% більше та чутливість реєстрації бета-частинок від джерела ^{90}Sr - ^{90}Y на 14% більше, ніж у детектора на основі ZnS:Ag та пластмасового сцинтилятора.

5. Набув подальшого розвитку технологічний процес виготовлення комбінованих детекторів для реєстрації фотонів низькоенергетичного рентгенівського випромінювання (для візуалізації об'єктів) з площею вхідної поверхні до 400 см^2 на основі композиційного сцинтилятора GAGG:Ce , оптично з'єднаного з волоконно-оптичною пластиною, який забезпечує просторове розділення на 25% вище, ніж у плоскопанельних детекторів з матрицею на тонкоплівкових транзисторах, виготовлених на основі екранів CsI:Tl або $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$.

Практичне значення мають такі результати:

– розроблено лічильні комбіновані детектори для реєстрації фотонів гамма-випромінювання з площею вхідної поверхні від 1000 см^2 на основі сцинтиляційного шару з полірованих гранул CsI:Tl , оптично з'єднаного зі світлопровідним шаром зі сцинтиляційного полістиролу, які мають чутливість реєстрації вище, ніж у детекторів на основі сцинтиляційного полістиролу з аналогічними розмірами вхідної поверхні та еквівалентним об'ємом сцинтилятора (підтверджено патентом на корисну модель України 126169);

– розроблено лічильні комбіновані детектори для реєстрації фотонів гамма-випромінювання з площею вхідної поверхні від 1000 см^2 на основі оптично з'єднаних сцинтиляційного шару з монокристалічних пластин NaI:Tl та світлопровідного шару із сцинтиляційного полістиролу, які мають чутливість реєстрації вище, ніж у детекторів на основі монокристалів NaI:Tl з еквівалентним об'ємом сцинтилятора;

– розроблено спектрометричні комбіновані детектори для реєстрації фотонів гамма-випромінювання з площею вхідної поверхні від 1000 см^2 , які складаються з оптично з'єднаних шарів з монокристалічних пластин NaI:Tl та сцинтиляційного

полістиролу, що мають енергетичне розділення від колімованого джерела ^{137}Cs менше, ніж 8,5% ($E_\gamma = 662 \text{ keV}$);

– розроблено спектрометричні комбіновані детектори з роздільною реєстрацією альфа- та бета-частинок з площею вхідної поверхні до 180 cm^2 , що мають чутливість реєстрації вище, ніж у детекторів на основі ZnS:Ag та пластмасового сцинтилятора. Розроблений в роботі технологічний процес впроваджено в Інституті сцинтиляційних матеріалів НАН України, м. Харків (акт від 17.12.2020 р., лабораторний регламент № 15:2020, лабораторний регламент № 24:2020);

– отримані практичні результати дозволили здійснити постачання комбінованих детекторів альфа- та бета-частинок підприємству «НВПІ Спарінг-Віст Центр» (Україна), що працює у галузі радіаційного моніторингу, згідно з договором № О/18-20;

– розроблені комбіновані детектори альфа- та бета-частинок можуть бути використані під час виготовлення приладів радіаційного контролю в підприємствах ТОВ «НВП «Тетра» (акт № Т-010-008 від 04.06.2021 р.) та ТОВ «Позитрон GMBH» (акт № 08/93 від 03.06.2021 р.);

– розроблено комбіновані детектори для реєстрації низькоенергетичних фотонів рентгенівського випромінювання (для візуалізації об'єктів) з площею вхідної поверхні до 400 cm^2 на основі композиційних сцинтиляторів GAGG:Ce з гранул, отриманих твердофазним синтезом, які мають просторове розділення вище, ніж у плоскопанельних детекторів з матрицею на тонкоплівкових транзисторах, виготовлених на основі екранів CsI:Tl або $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$.

Зауваження по дисертаційній роботі

В цілому позитивно оцінюючи виконану роботу, вважаю необхідним зробити деякі зауваження.

1. У підозділі 2.1, стр. 48 для елементів оптичного зв'язку сцинтиляційних сендвічей (полісилоксанів, епоксидів та акрилатів) не наведені дані про адгезію

до використаних в роботі матеріалів сцинтиляційного та світлопровідного шарів. Даний параметр є важливим для забезпечення стабільності характеристик детекторів у вивченому в роботі діапазоні температур.

2. Чи проводилися вимірювання спектрів пропускання композиційних шарів GAGG:Ce з гранул, отриманих твердофазним синтезом та полісилоксанових або епоксидних основ, бо ці дані відсутні в тексті дисертації? Якщо так, то наскільки підвищилася їх прозорість після збільшення показника заломлення оптичної основи? Як ці дані співвідносяться з результатами для шарів CsI:Tl?

3. Чому в роботі не розглянуті композиційні шари комбінованих детекторів на основі оптичної основи з показником заломлення 1,8 та 2,6, як у сцинтиляційних гранулах CsI:Tl, GAGG:Ce та ZnSe:Al?

4. Чи проводилися дослідження чутливості реєстрації комбінованих детекторів ZnSe:Al, виготовлених на основі сцинтиляційного шару у вигляді мозаїки з кристалічних пластин ZnSe:Al? Наскільки чутливість реєстрації детекторів такого типу корелює з даними для комбінованих детекторів альфа- та бета-частинок на основі гетерогенного шару ZnSe:Al?

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 випливають із отриманих результатів і відповідають поставленим меті і завданням дослідження.

Повнота викладених наукових положень та висновків

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою. Її текст складається із анотацій, вступу, п'яти розділів, списку використаних літературних джерел (143 найменування) і додатків, які містять копії актів про впровадження та використання результатів дисертаційної роботи. Основний зміст дисертації викладено на 143 сторінках друкованого тексту і містить 28 таблиць і 110 рисунків.

Матеріали дисертації опубліковано у 14 наукових працях, у тому числі 5 статей у наукових виданнях України (3 з яких реферовано в наукометричній базі Scopus), 1 патент України, 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.

- **Загальний висновок**

Дисертаційна робота Непокупної Тетяни Анатоліївни «Технологія виробництва комбінованих детекторів іонізуючого випромінювання» 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, Непокупна Тетяна Анатоліївна, заслуговує присудження їй наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки.

Офіційний опонент,

Кандидат технічних наук,

Доцент кафедри автоматизації та інформаційних систем

Кременчуцького національного університету

Ім. Михайла Остроградського МОН України

М.Г. Когдась

