

ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 539.51;

53.088.22:539.1.074.6:006.915+621.397.46

ОСОБЛИВОСТІ РЕЄСТРАЦІЇ ГАММА-ВИПРОМІНЮВАННЯ КОМБІНОВАНИМИ СЦИНТИЛЯЦІЙНИМИ ДЕТЕКТОРАМИ

НЕПОКУПНА Т.А., КОЛЕСНИКОВ О.В.,

БОЯРИНЦЕВ А.Ю., ТАРАСОВ В.О.,

ТАВРОВСЬКИЙ І.І.

Розробляються ефективні комбіновані детектори гамма-випромінювання, що працюють в лічильному та спектрометричному режимах реєстрації. Пропонується новий метод розділення сцинтиляційного сигналу за формою імпульсу.

Ключові слова: комбінований детектор, сцинтилятор, гамма-випромінювання, розділення за формою імпульсу, спектрометрія.

Key words: combined detector, scintillator, gamma-radiation, pulse shape discrimination, spectrometry.

1. Вступ

Радіаційний контроль об'єктів, що переміщуються, здійснюється за допомогою радіаційних портальних моніторів (РПМ), які дозволяють дистанційно виявляти різні радіонукліди [1]. Основною характеристикою РПМ є чутливість реєстрації, яка показує їхню можливість швидко та надійно виявляти джерела радіаційного забруднення. Математично чутливість обчислюється як відношення кількості імпульсів, що були зареєстровані приладом, до активності джерела та має розмірність імпл/с·кБк.

В РПМ найчастіше використовують сцинтиляційні детектори на основі сцинтиляційного полістиролу (ПС) або йодиду натрію, активованого талієм (NaI:Tl) [2, 3]. Вимоги до детекторів – це висока ефективність реєстрації та чутливість, велика площа активної поверхні та економічна ефективність. Перевагою детекторів на основі ПС є висока чутливість реєстрації фотонів гамма-квантів, що обумовлено площиною сцинтилятора. Але суттєвим недоліком таких детекторів є відсутність в амплітудному спектрі піку повного поглинання. Детектори на основі NaI:Tl мають хороші спектрометричні характеристики, але технологічні обмеження росту кристалів не дозволяють виробляти детектори великої площі. Тому зараз є актуальним розробка технології виробництва комбінованих детекторів на основі органічних та неорганічних сцинтиляторів (наприклад NaI:Tl або CsI:Tl), що об'єднує в одному приладі переваги різних детекторів. Залежно від типу матеріалу неорганічного сцинтилятора

(монокристалічні пластини або кристалічні гранули) комбіновані детектори реєструють фотони гамма-квантів як в лічильному, так і спектрометричному режимах.

При розробці комбінованих детекторів також необхідний метод розділення імпульсів від неорганічного сцинтилятора, для якого характерна спектрометрія, та органічного сцинтилятора, що працює в лічильному режимі реєстрації. Використання методу розділення сцинтиляційного сигналу за формою імпульсу підвищить ефективність реєстрації комбінованих детекторів та дозволить визначати радіонукліди за їх енергією.

2. Метод розділення сцинтиляційного сигналу за формою імпульсу

Метод розділення сцинтиляційного сигналу від детектора складається з системи збору даних, алгоритму відновлення базової лінії та алгоритму розділення сигналів за формою імпульсу.

1) Система збору даних.

Включає такі функціональні блоки та модулі: високовольний перетворювач, дільник напруги, аналого-цифровий перетворювач (АЦП) та програмовану логічну інтегральну схему (ПЛІС).

Схема живлення фотоелектронного помножувача (ФЕП) складається з високовольного перетворювача та дільника напруги. Високовольний перетворювач являє собою регульований двохтактний напівмостовий DC-DC перетворювач з гальванічною розв'язкою. Діапазон вихідних напруг складає 0,2-2,0 кВ. Рекомендований в технічній документації розподіл потенціалів на діодах ФЕП створюється резистивним дільником напруги. Тип ФЕП, що був використаний – Hamamatsu R1306 [4].

Для обробки сигналу використана плата ADC-SoC виробництва Terasic [5]. Сигнал з аноду ФЕП через симетричний трансформатор подається на вхід АЦП AD9254. Параметри оцифрування: частота дискретизації 100 МГц, розрядність 14 біт. Управління АЦП та попередня обробка даних проводиться в ПЛІС Cyclone V SE5CSEMA4U23C6N (Altera). Особливістю Cyclone V є наявність на кристалі фізичного процесора Hard Processor System (HPS) в складі двох ядер ARM Cortex-A9, що працюють на частоті 925 МГц. Зв'язок з персональним комп'ютером здійснюється по інтерфейсу 1 Gigabit Ethernet за допомогою протоколу UDP.

2) Алгоритм відновлення базової лінії.

Відновлення базової лінії є одним з найважливіших етапів обробки сигналу сцинтиляційних

детекторів. Від точності, що досягається на цьому етапі, залежить точність ідентифікації ізотопів. Саме точність визначення базової лінії головним чином визначає точність вимірювання амплітуди та енергії імпульсу. Серед досліджених варіантів найкращий результат показав алгоритм, який є комбінацією медіанного фільтру та фільтру середнього арифметичного. На першому етапі фільтрації проводиться сортування перших 45 відліків (450 нс), після чого відкидається 15 мінімальних та 15 максимальних значень. Залишені 15 значень усереднюються. Результат усереднення приймається за значення базової лінії.

3. Алгоритм розділення сигналів за формою імпульсу

Згідно з фізикою процесу реєстрації фотонів гамма-квантів комбінованим детектором, ми очікуємо появлення на виході детектору імпульсів трьох різних типів.

Імпульси першого типу (type1) виникають внаслідок взаємодії гамма-квантів тільки з матеріалом ПС, при цьому взаємодії гамма-квантів з NaI:Tl не відбувається. Такі імпульси мають характерний час наростання 10 нс та час загасання близько 30 нс (рис. 1).

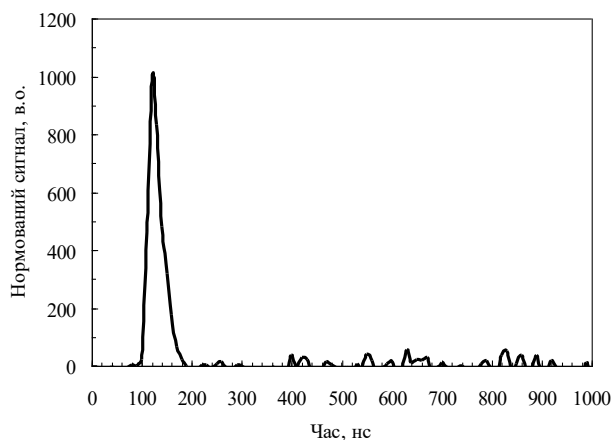


Рис. 1. Форма сцинтиляційного імпульсу від ПС

Імпульси другого типу (type2) виникають внаслідок взаємодії гамма-квантів тільки з матеріалом NaI:Tl, при цьому взаємодії гамма-квантів з ПС не відбувається. Такі імпульси мають характерний час загасання близько 250 нс (рис. 2).

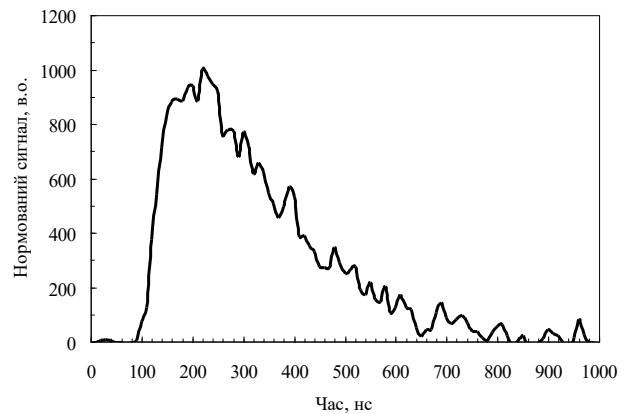


Рис. 2. Форма сцинтиляційного імпульсу від NaI:Tl

Імпульси третього типу (type3) виникають тоді, коли один гамма-квант взаємодіє і з NaI:Tl, і з ПС. Такі імпульси є суперпозицією відгуку ПС та NaI:Tl (рис. 3, 4). Залежно від співвідношення вкладів ПС та NaI:Tl в сумарний сигнал імпульси третього типу розділяються на п'ять підтипів (type31 – type35).

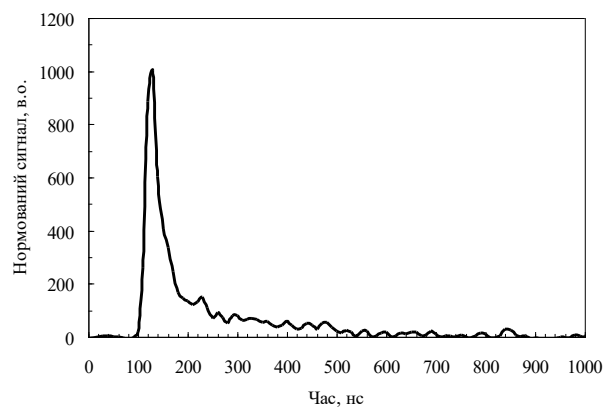


Рис. 3. Форма сцинтиляційного імпульсу від ПС та NaI:Tl одночасно, з переважним вкладом від ПС

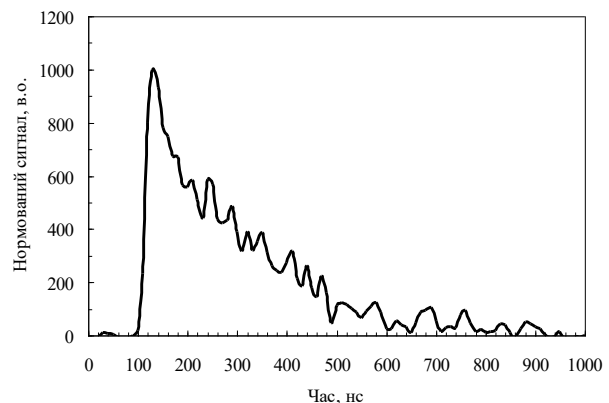


Рис. 4. Форма сцинтиляційного імпульсу від ПС та NaI:Tl одночасно, з переважним вкладом від NaI:Tl

Як бачимо з рис. 1-4, імпульси першого типу суттєво відрізняються за формою від імпульсів другого типу. Їх розділення не є занадто складним. Інша ситуація виникає при дискримінації імпульсів другого та третього типів. Різниця між даними імпульсами менш помітна, але вона спостерігається як на фронті імпульсу (швидкість наростання ближча до імпульсів першого типу), так і на його спаді (час загасання ближче до імпульсів другого типу). Зазначимо, що використання подібних часових характеристик не дозволило з достатньою надійністю розрізняти імпульси різних типів.

Для дискримінації імпульсів за формою був використаний найвний баєсів класифікатор:

$$c(\text{type}_j) = \arg \max_{c \in C} P(c | a_1, a_2 \dots a_n) = \\ = \arg \max_{c \in C} \left[\ln(P(c)) + \sum_t^N \ln(P(a_t | c)) \right] \quad (1)$$

де $P(c|a_1, a_2, \dots, a_n)$ – ймовірність того, що пред’явлений класифікатору імпульс $a(t)$ належить класу c ; C – множина типів імпульсів $C = \{\text{type1}, \text{type2}, \text{type31-type35}\}$; $P(c)$ – апіорна вірогідність появи імпульсу класу c ; $P(a_t|c)$ – розподіл вірогідності того, що відлік сигналу в момент часу t приймає значення a для класу c .

На етапі навчання класифікатора було відібрано по 500 імпульсів кожного типу. За цими навчальними вибірками були отримані розподіли $P(a_t|c)$. Для усунення впливу амплітуди імпульсу на розподіл $P(a_t|c)$ всі імпульси були нормовані за амплітудою. Було також застосовано адитивне згладжування для усунення нульових частот зустрічальності відліків.

$$\hat{a}_t = (a_t + \alpha) / (N + \alpha), \quad (2)$$

де $\hat{a}$ – згладжена оцінка частоти зустрічальності відліку a в момент часу t ; α – „псевдовідлік” $\alpha = 1$; N – кількість імпульсів у виборці.

3. Розроблення технологічного процесу виробництва комбінованих гама-детекторів

Технологічний процес виробництва комбінованих детекторів гама-випромінювання, що складається з ПС марки UPS-923A та кристалічних пластин NaI:Tl, включає такі етапи:

1. Виготовлення заготовки ПС з розмірами 50x100x1000 мм на стрічкопилному верстаті.
2. Фінішна обробка поверхні ПС на фрезерному верстаті шляхом одночасного використання твердосплавного та алмазного різців.

3. Механічне полірування усіх поверхонь заготовки ПС за допомогою дрібнодисперсних абразивів на основі оксиду алюмінію. Заготовка мала фінальні розміри 50x100x1000 мм.

4. Виготовлення заготовок NaI:Tl товщиною 10 мм на нитяній пилі.

5. Шліфівка усіх поверхонь заготовок NaI:Tl на плоскошліфувальному верстаті з використанням водного розчинника.

6. Хімічне полірування усіх поверхонь заготовок NaI:Tl за допомогою сумішей на основі одноатомних аліфатичних спиртів.

7. Оптичне склеювання заготовок ПС та NaI:Tl.

8. Формування шару дифузного відбивача світла на усіх поверхнях комбінованого сцинтилятора ПС-NaI:Tl, окрім ділянок на двох сторонах ПС з розмірами 50x100 мм, на які будуть монтовані два фотоприймача.

9. Упаковка комбінованого сцинтилятора ПС-NaI:Tl з відбивачем в свіло- та вологозахисний корпус.

10. Монтаж двох фотоприймачів R1306 Hamamatsu у світлозахисному корпусі на відкриті ділянки ПС з розмірами 50x100 мм.

11. Вимірювання сцинтиляційних характеристик комбінованого детектора.

Технологічний процес виробництва комбінованих детекторів гама-випромінювання, що складається з ПС марки UPS-923A та композиційного сцинтилятора йодистого цезію, активованого талієм (CsI:Tl), включає такі етапи:

1. Виготовлення та обробка поверхонь заготовки ПС за технологією, що описана у пунктах 1-3 для комбінованих детекторів гама-випромінювання на основі сцинтиляційного ПС та кристалічних пластин NaI:Tl. Заготовка ПС мала розміри 50x500x1000 мм.

2. Отримання та розділення кристалічних гранул CsI:Tl з розміром 100-500 мікрон, необхідних для виготовлення композиційного сцинтилятора Cs:Tl за методикою, описаною в роботі [6].

3. Двохразове промивання гранул CsI:Tl з розміром 100-500 мікрон в двохатомному аліфатичному спирті та висушування гранул при температурі +60°C і відносній вологості повітря 0-3% на протязі 6 годин.

4. Відділення кристалічних гранул CsI:Tl з розміром 63-300 мікрон.

5. Виготовлення заготовок композиційного сцинтилятора CsI:Tl товщиною 0,5 мм за методикою, описаною в роботах [6, 7].

6. Оптичне склеювання заготовки ПС та композиційних скінтіляторів CsI:Tl, формування шару з дифузного відбивача світла та упаковка комбінованого скінтілятора ПС-NaI:Tl з відбивачем в світло- та вологозахисний корпус за технологією, що описана у пунктах 7-9 для комбінованих детекторів гамма-випромінювання на основі скінтіляційного ПС та кристалічних пластин NaI:Tl.

7. Монтаж двох фотоприймачів R1306 Hamamatsu у світлозахисному корпусі на відкриті ділянки ПС з розмірами 50x500 мм.

8. Вимірювання скінтіляційних характеристик комбінованого детектора.

4. Скінтіляційні характеристики комбінованих гамма-детекторів

Для дослідження скінтіляційних характеристик комбінованих скінтіляторів були використані такі еталонні детектори: на основі скінтіляційного ПС з розмірами 50x100x1000 мм, 50x500x1000 мм та на основі кристалічного скінтілятора NaI:Tl з розмірами 50x100x400.

Швидкість лічення комбінованих та еталонних детекторів вимірювали на аналізаторі імпульсів CANBERA з використанням суматора імпульсів від двох ФЕП. Джерела випромінювання: ^{241}Am (активність 4600 кБк), ^{137}Cs (активність 140 кБк) та ^{232}Th (активність 2800 кБк) були розташовані в центрі скінтілятора NaI:Tl або CsI:Tl на відстані 100 см від детектора. Поріг реєстрації складав 20 кеВ для детектора ПС-CsI:Tl та 0,5 кеВ для детекторів ПС-NaI:Tl і NaI:Tl.

Чутливість детекторів η визначалася за формулою:

$$\eta = \frac{N_{\text{det}} - N_{\text{fon}}}{A}, \quad (3)$$

де N_{det} – швидкість лічення детектора, N_{fon} – фонові швидкість лічення, A – активність джерела.

Відносна ефективність реєстрації ε визначалася за рівнянням:

$$\varepsilon = \frac{N_{\text{det}}}{N_{\text{et}}}. \quad (4)$$

Тут N_{det} – швидкість лічення комбінованого детектора, N_{et} – швидкість лічення еталонного детектора.

Амплітудні спектри комбінованого детектора ПС-CsI:Tl в порівнянні з детектором на основі ПС представлені на рис. 5 та 6. Розраховані значення чутливості представлені в табл. 1.

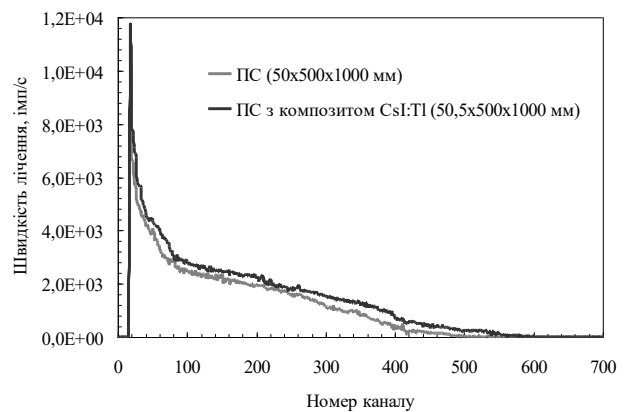


Рис. 5. Амплітудні спектри детекторів на основі ПС та ПС-CsI:Tl при опроміненні джерелом ^{137}Cs

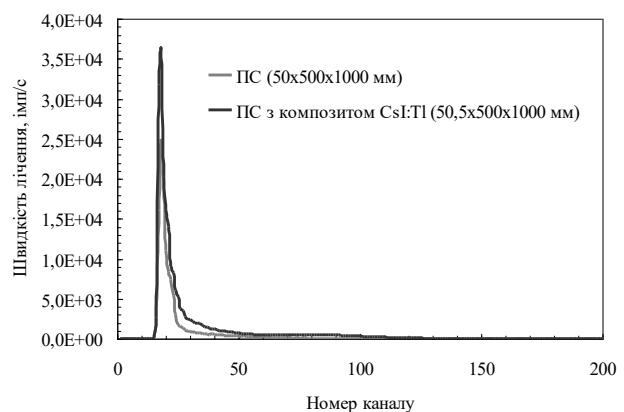


Рис. 6. Амплітудні спектри детекторів на основі ПС та ПС-CsI:Tl при опроміненні джерелом ^{241}Am

Таблиця 1
Чутливість детекторів на основі ПС та ПС-CsI:Tl

Тип детектору	Чутливість, імпл/с·кБк	
	^{137}Cs	^{241}Am
ПС (50x500x1000 мм)	28,59	7,64
ПС з композитом CsI:Tl (50,5x100x1000 мм)	35,03	13,65

Форма амплітудних спектрів комбінованих детекторів ПС-CsI:Tl свідчить про те, що детектори даного типу можуть реєструвати фотони гамма-квантів виключно в лічильному режимі. При опроміненні джерелом ^{232}Th різниця в швидкості лічення детекторів на основі ПС та комбінованого детектора ПС-CsI:Tl склала не більше 2% через те, що товщина композиційного шару була замалою для реєстрації частинок з великою енергією. Як свідчать дані табл. 1, чутливість комбінованого детектора ПС-CsI:Tl на 22% вища при опроміненні джерелом ^{137}Cs та на 78% вища при опроміненні джерелом ^{241}Am , якщо порівняти з відповідними значеннями для детектора на основі

ПС. Дані результати є кращими, ніж ті, що отримані в попередніх дослідженнях [7].

Амплітудні спектри комбінованого детектора ПС-NaI:Tl та еталонних детекторів ПС і NaI:Tl, отримані з використанням методу розділення сцинтиляційних імпульсів за формою, представлені на рис. 7-9. Розраховані значення чутливостей показані в табл. 2.

Як можна побачити з рисунків 7-9, наявність кристалічного шару NaI:Tl в комбінованому детекторі приводить до появи в амплітудних спектрах піків повного поглинання.

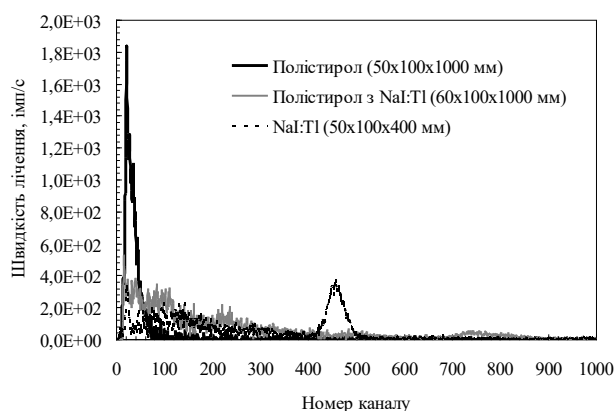


Рис. 7. Амплітудні спектри детекторів на основі ПС, ПС-NaI:Tl та NaI:Tl при опроміненні джерелом ^{137}Cs

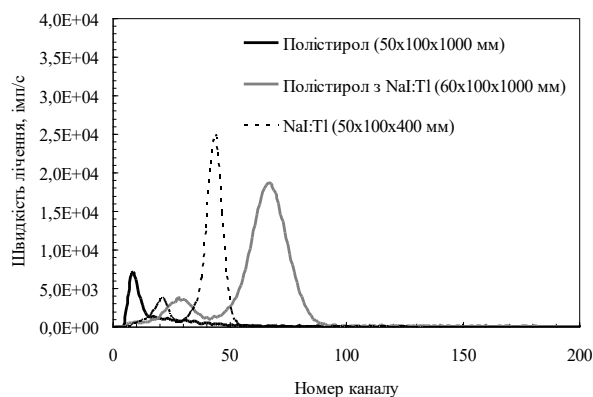


Рис. 8. Амплітудні спектри детекторів на основі ПС, ПС-NaI:Tl та NaI:Tl при опроміненні джерелом ^{241}Am

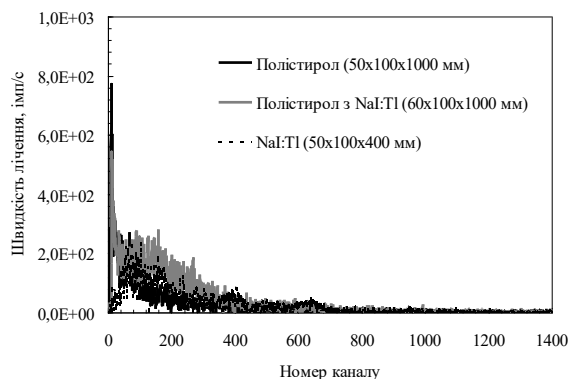


Рис. 9. Амплітудні спектри детекторів на основі ПС, ПС-NaI:Tl та NaI:Tl при опроміненні джерелом ^{232}Th

Таблиця 2
Чутливість детекторів на основі ПС, ПС-NaI:Tl та NaI:Tl

Тип детектору	Чутливість, імп/с·кБк		
	^{137}Cs	^{241}Am	^{232}Th
ПС (50x100x1000 мм)	2,50	0,15	0,12
ПС з NaI:Tl (60x100x1000 мм)	4,22	0,90	0,21
NaI:Tl (50x100x400 мм)	3,23	0,54	0,14

Згідно з даними табл. 2, найкращу чутливість має комбінований детектор ПС-NaI:Tl: на 68% вищу порівняно з ПС та на 30% вищу порівняно з NaI:Tl при опроміненні джерелом ^{137}Cs ; у 6 разів вищу порівняно з ПС та на 67% вищу порівняно з NaI:Tl при опроміненні джерелом ^{241}Am ; на 75% вищу порівняно з ПС та на 50% вищу порівняно з NaI:Tl при опроміненні джерелом ^{232}Th .

Розраховані значення відносної ефективності реєстрації детекторів показані в табл. 3. Як бачимо, комбінований детектор ПС-NaI:Tl має ефективність реєстрації вищу, ніж у NaI:Tl або ПС.

Таблиця 3
Відносна ефективність реєстрації детекторів на основі ПС, ПС-NaI:Tl та NaI:Tl

Тип детектору	^{137}Cs	^{241}Am	^{232}Th
ПС (50x100x1000 мм)	1,0	1,0	1,0
ПС з NaI:Tl (60x100x1000 мм)	2,2	10,2	2,3
NaI:Tl (50x100x400 мм)	1,3	5,8	1,1

Розраховане також енергетичне розділення комбінованого детектора ПС-NaI:Tl, яке склало 12% для енергії 662 кеВ від джерела ^{137}Cs , що є хорошим результатом для детектора з площиною 1000 см².

4. Висновки

Розглянуто технологію виробництва великогабаритних комбінованих детекторів гамма-випромінювання на основі з'єднаних шарів з сцинтиляційного полістиролу та кристалічного сцинтилятора NaI:Tl, активованого талієм, або композиційного сцинтилятора CsI:Tl.

Запропоновано новий метод розділення сцинтиляційного сигналу від комбінованих детекторів за формою імпульсу, що дозволяє спектрометрично ідентифікувати радіонукліди.

Встановлено, що наявність шару неорганічного сцинтилятора на поверхні шару ПС підвищує ефективність та чутливість реєстрації фотонів гамма-квантів порівняно з детекторами на основі ПС або кристалічного NaI:Tl.

Комбінований детектор PC-NaI:Tl розділяє радіонукліди за енергією: енергетичне розділення детектора складає 12% для енергії 662 кеВ від джерела ^{137}Cs .

Література: 1. Дубіна В.Н., Ковтун В.Е. Концепция радиационного портального монитора нового поколения // Вісник Харківського університету. 2009. №.845. С.108-121. 2. Гринев Б.В., Гурджян Н.Р., Зеленская О.В., Любинский В.Р., Мицай Л.И., Молчанова Н.И., Тарасов В.А. Детекторы на основе пластмассовых сцинтилляторов для портальных мониторов – оценивание неопределенности чувствительности // Ukrainian Metrological journal. 2018. № 2. Р.46-54. 3. Deyglun C. Testing and performances of Spectroscopic Radiation Portal Monitor for homeland security // EPJ Web of Conferences ANIMMA 2019. 2020. Vol. 225, DOI:10.1051/epjconf/202022507008.4.https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT_TPMZ0002E.pdf 5. <https://www.terasic.com.tw/> 6. Бояринцев А.Ю., Непокупна Т.А., Онуфриев Ю.Д., Сибілева Т.Г. Комбінований детектор гамма-випромінювання // Патент на корисну модель. 2018. № 126169. 7. Nepokupnaya T.A., Ananenko A.A., Boyarintsev A.Yu., Bobovnikov A.A., Gektin A.V., Kovalchuk S.N., Onufriyev Yu.D., Pedash V.Yu. Large area detector of low-energy gamma radiation // Functional materials. 2017. Vol. 24, №.4. Р. 678-681.

Транслітерований список літератури:

1. Dubina V.N., Kovtun V.E. The concept of radiation portal monitor of new generation // Visnik Harkivs'kogo universitetu. 2009. №.845. P.108-121.
2. Grinyov B.V., Gurdzhyan N.R., Zelenskaya O.V., Lyubynskiy V.R., Mitsay L.I., Molchanova N.I., Tarasov V.A., Detectors based on plastic scintillators for portal monitors - the evaluation of sensitivity uncertainty // Ukrainian Metrological journal. 2018. № 2. P.46-54.
3. Deyglun C. Testing and performances of Spectroscopic Radiation Portal Monitor for homeland security // EPJ Web of Conferences ANIMMA 2019. 2020. Vol. 225, DOI:10.1051/epjconf/202022507008.
4.https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT_TPMZ0002E.pdf
5. <https://www.terasic.com.tw/>
6. Boyarintsev A.Yu., Nepokupna T.A., Onufriyev Yu.D., Sibileva T.G. Combined detector of gamma-radiation // Ukraine patent. 2018. № 126169.
7. Nepokupnaya T.A., Ananenko A.A., Boyarintsev A.Yu., Bobovnikov A.A., Gektin A.V., Kovalchuk S.N., Onufriyev Yu.D., Pedash V.Yu. Large area detector of low-energy gamma radiation // Functional materials. 2017. Vol. 24, №.4. P. 678-681.

Надійшла до редколегії 15.06.2020

Рецензент: д-р фіз.-мат. наук, проф. Сліпченко М.І.

Непокупна Тетяна Анатоліївна, науковий співробітник відділу впровадження науково-технічних розробок, Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України. Наукові інтереси: технологія виробництва детекторів іонізуючих випромінювань. Адреса: Україна,

61072, Харків, пр. Науки, 60, e-mail: nepokupnaya@isma.kharkov.ua

Колесніков Олександр Володимирович, канд. техн. наук, старший науковий співробітник відділу впровадження науково-технічних розробок, Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України. Наукові інтереси: автоматизовані системи керування. Адреса: Україна, 61072, Харків, пр. Науки, 60, e-mail: kolesnikov@isma.kharkov.ua

Бояринцев Андрій Юрійович, канд. техн. наук, заступник директора з наукової роботи, Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України. Наукові інтереси: технологія виробництва детекторів іонізуючих випромінювань. Адреса: Україна, 61072, Харків, пр. Науки, 60, e-mail: boyarintsev@isma.kharkov.ua

Тарасов Володимир Олексійович, д-р фіз.-мат. наук, завідувач відділу сцинтиляційної радіометрії і радіохімічних методів дослідження, Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України. Наукові інтереси: розробка спеціалізованих детекторів іонізуючих випромінювань. Адреса: Україна, 61072, Харків, пр. Науки, 60, e-mail: tarasov@isc.kharkov.com

Тавровський Ігор Ігоревич, канд. техн. наук, старший науковий співробітник відділу впровадження науково-технічних розробок, Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України. Наукові інтереси: автоматизовані системи керування. Адреса: Україна, 61072, Харків, пр. Науки, 60, e-mail: tawr@isma.kharkov.ua

Nepokupnaya Tatiana, Researcher, Research-and-Development Applications Division, Institute for Scintillation Materials of NAS of Ukraine. Scientific interests: production technology of radiation detectors. Address: Ukraine, 61072, Kharkiv, Nauky ave, 60, e-mail: nepokupnaya@isma.kharkov.ua

Kolesnikov Alexandr, PhD (Technology), Senior researcher, Research-and-Development Applications Division, Institute for Scintillation Materials of NAS of Ukraine. Scientific interests: automated control systems. Address: Ukraine, 61072, Kharkiv, Nauky ave, 60, e-mail: kolesnikov@isma.kharkov.ua

Boyarintsev Andrey, PhD (Technology), Deputy Director of Science, Institute for Scintillation Materials of NAS of Ukraine. Scientific interests: production technology of radiation detectors. Address: Ukraine, 61072, Kharkiv, Nauky ave, 60, e-mail: boyarintsev@isma.kharkov.ua

Tarasov Vladimir, Dr. Sci., Head of department, Scintillation Radiometry and Radiochemical Testing Methods Department, Institute for Scintillation Materials of NAS of Ukraine. Scientific interests: development of specialized radiation detectors. Address: Ukraine, 61072, Kharkiv, Nauky ave, 60, e-mail: tarasov@isc.kharkov.com

Tavrovskiy Ihor, PhD (Technology), Senior researcher, Research-and-Development Applications Division, Institute for Scintillation Materials of NAS of Ukraine. Scientific interests: automated control systems. Address: Ukraine, 61072, Kharkiv, Nauky ave. 60, e-mail: tawr@isma.kharkov.ua