

- урана. Пат. РФ № 2282904 от 27.08.2006. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2006, № 24, с. 549—550.
2. **Филимонов С.В., Лебедев А.Я., Асадулин Р.С. и др.** Способ восстановления изотопного регенерированного урана. Пат. РФ № 2759155 от 09.11.2021. — Там же, 2021, № 31.
 3. **Мазин В.И., Водолазских В.В., Журин В.А. и др.** Способ изотопного восстановления регенерированного урана. Пат. РФ № 2497210 от 27.10.2013. — Там же, 2013, № 30, с. 714—715.
 4. **Палкин В.А.** Разделение изотопов урана в каскаде с промежуточным отбором. — Перспективные материалы, 2010, № 8, с. 11—14.
 5. **Смирнов А.Ю., Сулаберидзе Г.А.** Обогащение регенерированного урана с одновременным разбавлением $^{232-236}\text{U}$ природным сырьем и отвальным ураном. — Атомная энергия, 2014, т. 117, вып. 1, с. 36—41. // **Smirnov A.Yu., Sulaberidze G.A.** Enrichment of Regenerated Uranium with Simultaneous Dilution of $^{232-236}\text{U}$ by Raw and Waste Uranium. — Atomic Energy, 2014, v. 117, № 1, p. 44—51.
 6. **Смирнов А.Ю., Сулаберидзе Г.А., Дудников А.А., Невиница В.А.** Обогащение регенерированного урана в каскаде газовых центрифуг с одновременным разбавлением $^{232-236}\text{U}$ отвальным и низкообогащенным ураном. — Там же, 2017, т. 125, вып. 5, с. 287—290. // **Smirnov A.Yu., Sulaberidze G.A., Dudnikov A.A., Nevinitza V.A.** Enrichment of Regenerated Uranium in a Gas Centrifuge Cascade with Simultaneous Dilution of $^{232-236}\text{U}$ by Waste and Low-Enrichment Uranium. — Ibid., 2017, v. 122, № 5, p. 353—357.
 7. **Smirnov A.Yu., Gusev V.E., Sulaberidze G.A., Nevinitza V.A.** A Method to enrich reprocessed uranium with various initial contents of even-numbered isotopes. — AIP Conf. Proc., 2019, v. 2101, p. 020006.
 8. **Палкин В.А.** Трехкаскадная схема очистки регенерированного гексафторида урана от $^{232, 234, 236}\text{U}$. — Атомная энергия, 2022, т. 132, вып. 6, с. 346—352.
 9. **Management of High Enriched Uranium for Peaceful Purposes. Status and Trends.** Vienna: IAEA, 2005.
 10. **Палкин В.А.** Многопоточные каскады для разделения многокомпонентных изотопных смесей. — Атомная энергия, 2015, т. 119, вып. 2, с. 101—105. // **Palkin V.A.** Multistream Cascades for Separation of Multicomponent Isotopic Mixtures. — Atomic Energy, 2015, v. 119, № 2, p. 125—131.
 11. **Hooke R., Jeeves T.** Direct search solution of numerical and statistical problems. — J. Ass. Comput. Mach., 1961, № 8, p. 212—229.
 12. **Сазыкин А.А.** Термодинамический подход к разделению изотопов. — В кн.: Изотопы: свойства, получение, применение. Под ред. В.Ю. Баранова. М.: ИздАТ, 2000, с. 72—108.

Поступила в Редакцию 28.12.22

УДК 539.1.074.3+539.1.074.83+539.1.074.88

РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ НЕЙТРОНОВ РАЗНОЙ ЭНЕРГИЕЙ

Мосягина И.В., Ивкина О.В., Шарипова М.А., Чебышов С.Б. (АО «СНИИП», г. Москва)

e-mail: irvmosyagina@sniip.ru

Наибольшее распространение в области устройств для одновременной регистрации нейтронов разной энергией получили блоки детектирования на основе сфер Боннера [1, 2]. Общим элементом таких блоков детектирования является система датчиков нейтронов, помещенных в сферы из материала-замедлителя, например, парафина разной толщины. Толщина замедлителей подобрана таким образом, чтобы каждый датчик регистрировал отдельный энергетический компонент нейтронного потока (тепловые, промежуточные и быстрые нейтроны). По сути, датчики отличаются один от другого только толщиной замедлителя, детектор нейтронов в каждом элементе одинаков и чаще всего это сцинтилляционный материал или гелиевый счетчик. Диапазон измерения подобного устройства составляет 0,025 эВ—20 МэВ. Посредством математической обработки сигналов

от каждого детектора восстанавливается исходный спектр нейтронов.

Основная идея, реализуемая в рамках настоящей работы, заключается в применении разных по компонентному составу сцинтилляционных материалов с разным временем высвечивания фотонов для регистрации компонентов нейтронного потока. Традиционно тепловые нейтроны регистрируются по (n, α)-реакции на ядрах ^{10}B , ^6Li , в настоящей работе для этих целей рассмотрены образцы с гадолинием. Для регистрации потока быстрых нейтронов использован метод протонов отдачи [3, 4]. Основным условием реализации этого метода является наличие водородосодержащей матрицы. В настоящей работе исследованы полистирол, полиметилметакрилат (ПММА), поликарбонат, каучук СКТН. В качестве люминесцентных добавок рассмотрены составы, приведенные в табл. 1. Была из-

Таблица 1. Люминофоры, использованные для изготовления детектирующих материалов

Люминофор	Состав	Длина волны высвечивания, нм	Время высвечивания τ , нс
ФС-4	ZnS:Ag	450	10 000
РС-424	Sr ₃ (PO ₄) ₂ :Eu	430	5000
РС-450	ZnS:Ag,Co,Ni	460	200
РС-453	CaB ₅ O ₉ Cl:Eu	460	1000
РТР	C ₁₈ H ₁₄	335	1,2
PBD (2,5-дифенил-1,3,4-оксадиазол)	C ₂₀ H ₁₄ N ₂ O	356—360	1,2
РОРОР (1,4-бис (5-фенил-2-оксазол) бензол)	C ₂₄ H ₁₆ N ₂ O ₂	415—417	1,5
РРО, DPO (2,5-дифенилоксазол)	C ₁₅ H ₁₁ NO	365	1,6
бис-MSB (1,4-бис (2-метилстирил) бензол)	C ₂₄ H ₂₂	420	1,2

готовлена серия экспериментальных образцов разного состава (табл. 2).

Таблица 2. Изготовленные и исследованные детектирующие материалы

Образец	Регистрация нейтронов	Состав
ДМ-1	Тепловые	ПММА+(ZnS+ ⁶ LiF)
ДМ-2	Быстрые	Полистирол+РТР+Sr ₃ (PO ₄) ₂ :Eu
ДМ-3-1	Промежуточные	Полистирол+Gd ₂ O ₃ +PBO+РОРОР
ДМ-3-2		ПММА+ZnS:Ag,Co,Ni+ ⁶ LiF
ДМ-3-3		ПММА+CaB ₅ O ₉ Cl:Eu+ ⁶ LiF

Счетные характеристики экспериментальных образцов при облучении источниками ионизирующего излучения приведены в табл. 3. Скорость счета приведена без вычета сигнала от γ -фона источника излучения. Вычитание γ -спектра проведено далее при сравнении спектров образцов. Схема измерений показана на рис. 1. Источником ионизирующего излучения являлись ¹³⁷Cs активностью 18 кБк, ⁹⁰Sr + ⁹⁰Y активностью 1,5 кБк и ²³⁹Pu—Be с нейтронным потоком $5 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$.

В качестве ДМ-3 была изготовлена серия образцов с разным строением функционального объема: Gd₂O₃ распределен по объему, слой

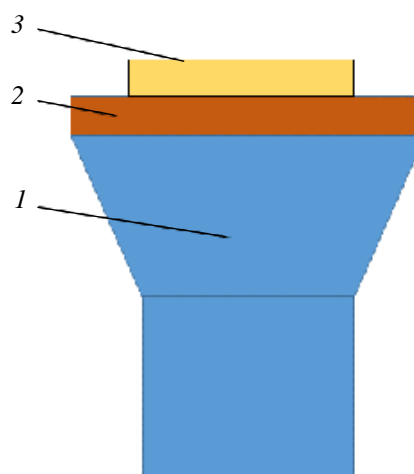


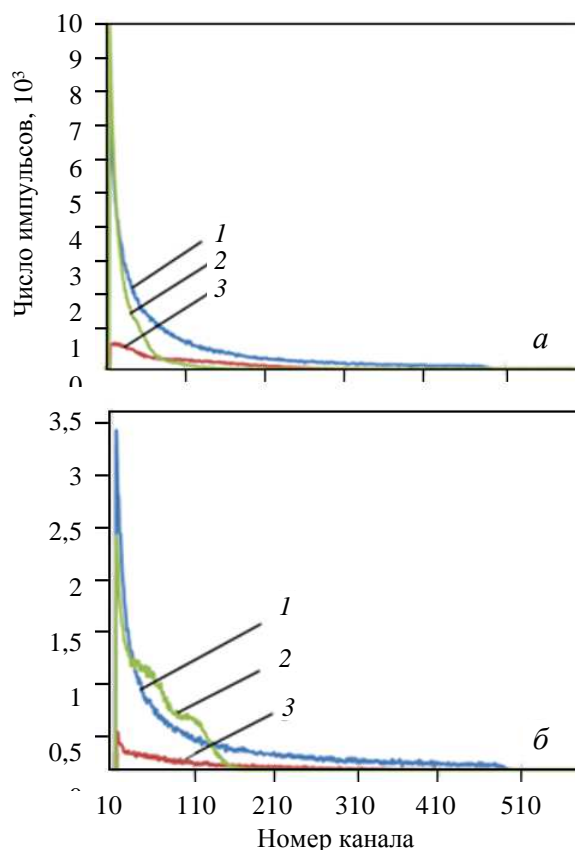
Рис. 1. Схема измерения образцов: 1 — ФЭУ; 2 — исследуемый образец; 3 — источник ионизирующего излучения

Gd₂O₃ сформирован на поверхности или расположен посередине образца. Во всех трех случаях n -, β -, γ -спектры значительно отличаются по форме. На рис. 2 показаны n -, β -, γ -спектры образцов со срединным и поверхностным расположением слоя Gd₂O₃. Отметим, что спектры источника ²³⁹Pu—Be приведены после вычитания γ -фона того же источника.

На этом этапе работы задачей являлся не выбор конкретного материала в качестве того или иного компонента комбинированного де-

Таблица 3. Счетные характеристики экспериментальных образцов детектирующих материалов, имп./с

Образец	Состав	Собственный фон	⁹⁰ Sr + ⁹⁰ Y	¹³⁷ Cs	²³⁹ Pu—Be
ДМ-1	ПММА+(ZnS+ ⁶ LiF)	0,01	0,62	0,03	452,35
ДМ-2	Полистирол+РТР+Sr ₃ (PO ₄) ₂ :Eu	0,35	192,78	54,75	970,64
ДМ-3-1	Полистирол+Gd ₂ O ₃ +PBO+РОРОР	15,87	442,42	1806,64	2504,57
ДМ-3-2	ПММА+ZnS:Ag,Co,Ni+ ⁶ LiF	0,08	0,12	0,05	256,77
ДМ-3-3	ПММА+CaB ₅ O ₉ Cl:Eu+ ⁶ LiF	0,07	1,15	0,04	280,09



Р и с. 2. Спектры образцов ДМ-3-1 при облучении ^{239}Pu — Be (1), ^{137}Cs (2), $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ (3) со срединным (а) и поверхностным расположением слоя Gd_2O_3 (б)

тектора, поскольку использование разработанных материалов будет определено на последующих этапах с учетом возможностей аппаратного разделения сигналов по форме импульса.

С учетом уровня развития устройств и методов цифровой обработки сигналов представляется необходимым рассмотреть гадолиний и его соединения в качестве детектирующего материала для нейтронов в связи с дефицитом изотопной продукции (^6Li , ^{10}B).

Уникальным детектирующим материалом для селективной регистрации нейтронных потоков разной энергией является радиатор ионизационной камеры деления — нейтронделящийся слой на основе оксидов ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th и др. Селективный захват быстрых нейтронов энергией $E_n > 1,4$ МэВ осуществляется четно-четными ядрами, среди которых сравнительно большое сечение деления имеют ^{238}U ($\sigma = 0,942$ б) и ^{232}Th ($\sigma = 0,387$ б). Ранее [5, 6] было показано, что переход от монослойных толщиной 1,5 мкм к полислойным структурам в материалах радиа-

торов с организацией межслоевого расстояния 20—30 нм предотвращает рост нанокристаллитов и тем самым повышает долговечность функционального слоя [7].

Представляется необходимым рассмотреть долговечности материалов для нейтронного детектирования с точки зрения выполнения неравенства

$$D/L^2 \geq [1 - \exp(-\Sigma x)FS], \quad (1)$$

где D — коэффициент диффузии дефекта структуры детектирующего материала; L — линейный размер до области стока дефектов (свободной поверхности); Σ — сечение взаимодействия с нейтроном; x — толщина детектирующего материала; F — плотность нейтронного потока; S — площадь детектора. Правая часть выражения (1) определяет скорость образования радиационно-индуцированных дефектных областей, левая — скорость аннигиляции дефектов.

Таким образом, с учетом развития систем цифровой обработки сигналов возможно создание новых устройств детектирования и материалов для регистрации нейтронов. Существует возможность использования доступных природных нейтронно-чувствительных элементов взамен дорогостоящих и труднодоступных изотопных продуктов.

Разработка новых материалов для детектирования нейтронов требует комплексного подхода, учета разных факторов: от функциональной чувствительности до скорости выгорания функциональных изотопов. Для повышения радиационной устойчивости и долговечности нейтрондетектирующих материалов необходимо применять технологии полинаслаивания для реализации возможностей стока радиационно-индуцированных дефектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Marek M., Viererbl L., Flibor S. e.a. Validation of epithermal neutron beam at LVR-15. — In: 9th Intern. Symp. on NCT for Cancer. Japan, 2000, p. 331—336.
2. Wiegel B., Alevra A.V. NEMUS — the PTB Neutron Multiphase Spectrometer: Bonner sphere and more. — Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, 2002, v. 476, p. 36—41.
3. Стогов Ю.В. Основы нейтронной физики. Учебное пос. М., МИФИ, 2008. 204 с.
4. Власов Н.А. Нейтроны. М.: Гос. изд-во техн.-теор. лит-ры, 1955. 215 с.
5. Сахаров В.В., Басков П.Б., Мосягина И.В. Квазикомпозитное структурирование ураноксидных радиаторов ионизационных камер деления. Тезисы докл. XIII Межд. сем. «Структурные основы модифицирования

материалов». Обнинск, ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2015, с. 126.

6. Baskov P.B., Chebyshev S.B., Kadilin V.V. et al. Investigation of possibility of creation of radiation resistance sensors for physical information based on fiber materials. — J. Phys.: Conf. Ser., 2016, № 675, at. 042017.

7. Егоров А.В., Басков П.Б., Сахаров В.В., Мосягина И.В. Ураноксидный радиатор ионизационной камеры деления. Патент RU 152 036. Заявл. 26.08.2014. Оpubл. 27.04.2015. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2015, № 12.

Поступила в Редакцию 14.06.22

УДК 539.1.074.88

СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ СТЕНД НА ОСНОВЕ СТИЛЬБЕНА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ

Савин Д.И., Урупа И.В., Лунарь Е.Э., Ибрагимов Р.Ф., Рябева Е.В. (НИЯУ МИФИ, г. Москва)

e-mail: ivurupa@mephi.ru

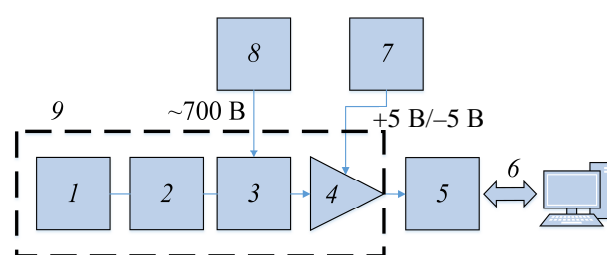
Спектрометрия нейтронного излучения является актуальной как для фундаментальных научных исследований, так и для прикладных задач: радиационной безопасности, ядерной энергетики и медицины. Быстрые нейтроны по протонам отдачи могут регистрироваться детекторами с органическими сцинтилляторами. Одним из часто используемых сцинтилляторов для разделения нейтронов и γ -квантов является монокристаллический стильбен [1—3].

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию спектрометрического стенда с детектором на основе стильбена с цифровой обработкой сигнала для получения энергетических спектров источников нейтронов и γ -квантов.

Для решения поставленной задачи необходимо провести калибровку детектора и получить матрицы откликов детектора для нейтронов и γ -квантов. Помимо этого, необходимо с использованием специально разработанных методов, например, метода регуляризации Тихонова или итерационных алгоритмов восстановить исходные энергетические спектры источников [4].

Эксперимент. Детектор включает в себя цилиндрический монокристалл стильбена размером 40×40 мм, вакуумный фотоэлектронный умножитель Hamamatsu R6231-100 (Япония), делитель напряжения для ФЭУ и предусилитель (рис. 1).

Благодаря разной форме формирующихся в детекторе сигналов от нейтронов и γ -квантов появляется возможность использовать метод разделения n -, γ -излучения по форме импульса. Для этого используется аппаратура цифровой обработки импульсов CAEN DT5730B (Италия).



Р и с. 1. Схема спектрометрического стенда на основе монокристалла стильбена: 1 — монокристалл стильбена; 2 — ФЭУ; 3 — делитель напряжений; 4 — предусилитель; 5 — аппаратура цифровой обработки импульсов; 6 — оптический интерфейс; 7, 8 — источник низкого и высокого напряжения соответственно; 9 — светоизолирующий кожух

Информация считывается параллельным АЦП с 14-битным разрешением и частотой дискретизации 500 Мбит/с. CAEN DT5730B имеет восемь входных каналов, коммуникация с персональным компьютером осуществляется через USB и интерфейсы оптической связи. CAEN DT5730B используется с прошивкой, специально разработанной для разделения нейтронов и γ -квантов методом интегрирования заряда [5].

В работе использовались генераторы D—T- и D—D-нейтронов ИНГ-07Т и ИНГ-07Д соответственно [6]. Расстояние между мишенью генератора и детектором составляло 40 см, плотность потока нейтронов в точке расположения детектора — $10^5 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, время измерения — 10 мин.

Калибровка детектора. Калибровка спектрометрического стенда проводится отдельно для каждого вида излучения. Поскольку световой выход от протонов в сцинтилляторе отличается от электронного, калибровка для γ -квантов проводилась по краям комптоновского распределения ^{60}Co , ^{60}Bi , ^{22}Na [7]. Калибровочная зависимость