

ISSN 1561-2430 (Print)
ISSN 2524-2415 (Online)

ФИЗИКА PHYSICS

ISSN 1561-2430 (Print)
ISSN 2524-2415 (Online)
УДК 539.1.07 + 539.1.074.3
<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2021-57-2-217-223>

Поступила в редакцию 23.02.2021
Received 23.02.2021

М. В. Коржик

Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

ГАДОЛИНИЙ-СОДЕРЖАЩЕЕ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОЕ СТЕКЛО ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ НЕЙТРОНОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ

Аннотация. Неорганические сцинтилляционные стекла формируют домен быстроразвивающихся детекторных материалов, используемых для детектирования различных видов ионизирующего излучения. Наибольшее распространение получили литий-силикатные стекла, обогащенные изотопом ${}^6\text{Li}$, которые используются для регистрации тепловых нейтронов. Вместе с тем в силу специфики энергетической зависимости сечения нейтронов легких ядер такие материалы малопригодны для регистрации эпитептермальных и более высокоэнергетических нейтронов. Использование редкоземельных элементов в составе стекол позволяет повысить чувствительность к нейтронам. В системе $\text{BaO-Gd}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ при активации ионами церия впервые создано сцинтилляционное стекло с выходом не менее 2500 фот/МэВ, что позволяет создавать недорогие детекторные элементы значительного объема для регистрации нейтронов. Установлено, что детекторы на основе стекла $\text{BaO-Gd}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ обладают удовлетворительными детекторными свойствами при регистрации нейтронов в широком спектре их энергий.

Ключевые слова: сцинтиллятор, стекло, световыход, гадолиний, нейтрон

Для цитирования. Коржик, М. В. Гадолиний-содержащее сцинтилляционное стекло для регистрации нейтронов в широком диапазоне энергий / М. В. Коржик // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2021. – Т. 57, № 2. – С. 217–223. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2021-57-2-217-223>

Mikhail V. Korzhik

Institute of Nuclear Problems of the Belarus State University, Minsk, Belarus

GADOLINIUM CONTAINED SCINTILLATION GLASS FOR NEUTRON DETECTION IN A WIDE ENERGY RANGE

Abstract. Inorganic scintillation glasses form a domain of rapidly evolving detector materials used to measure various types of ionizing radiation. The most widespread are lithium-silicate glasses enriched with the ${}^6\text{Li}$ isotope, which are used to register thermal neutrons. At the same time, due to the specificity of the energy dependence of the neutron cross-section of light nuclei, such materials are of little use for the evaluation of epithermal and more highly energetic neutrons. The use of rare earth elements in the composition of glasses makes it possible to increase the sensitivity to neutrons. In the $\text{BaO-Gd}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ system, doped with Ce ions, a scintillation glass with a yield of at least 2500 photons / MeV was created for the first time, which permits to create inexpensive detector elements of a significant volume for registering neutrons. It has been shown that a detector based on $\text{BaO-Gd}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glass has satisfactory properties when detecting neutrons in a wide spectrum of their energies.

Keywords: scintillator, glass, light yield, gadolinium, neutron

For citation. Korzhik M. V. Gadolinium contained scintillation glass for neutron detection in a wide energy range. *Vesti Natsyianal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2021, vol. 57, no. 2, pp. 217–223 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2021-57-2-217-223>

Введение. Неорганические сцинтилляционные материалы, содержащие изотоп ${}^6\text{Li}$ [1, 2] рекомендовали себя как эффективные детекторные материалы для регистрации тепловых нейтронов. Недавно было установлено, что расширение энергетического диапазона регистрируемых нейтронов обеспечивается при использовании гадолиний-содержащих кристаллических сцинтилляторов [3, 4]. Стекланные сцинтилляционные материалы обладают невысоким выходом сцинтилляций по сравнению с кристаллическими соединениями, однако при наполнении композиции стекла ионами с ядрами, активно поглощающими нейтроны с образованием вторичных ионизирующих частиц, могут рассматриваться как альтернатива кристаллическим материалам, прежде всего благодаря их относительно простому и недорогому способу производства. Среди многообразия стекол силикатное стекло относительно простых композиций позволяет получать наибольший выход при активации ионами церия или тербия [5]. Из стекла могут быть изготовлены различные элементы путем выработки в форму, вплоть до блоков больших объемных размеров, либо в форме волокна. Силикатное стекло с добавлением модификаторов получают по стандартной технологии производства при температурах 1400–1550 °С с последующей термической обработкой отжигом при относительно низкой температуре. Стекло на основе легкого силиката лития подробно рассмотрено ранее [6]. Также было получено тяжелое силикатное сцинтилляционное стекло на основе тяжелых элементов, таких как Ва [7, 8]. Стекло со стехиометрическим составом дисиликата бария ($\text{BaO}\cdot 2\text{SiO}_2$), легированное Се (Disilicate of Barium, DSB:Ce), является одним из новых сцинтилляционных материалов. В случае подобных двухкатионных силикатных систем структура сетки стекла образована слоями тетраэдрически координированного кремния с ионами элемента-модификатора между ними. Двухвалентные ионы Ba^{2+} в стекле могут быть частично заменены другими одно- и двухвалентными ионами первой или второй групп или трехвалентными редкоземельными ионами. Поэтому естественным направлением исследований стало внедрение в барий-кремниевое стекло ионов гадолиния с целью создания Ва–Gd–Si сцинтилляционного стекла для регистрации нейтронов.

Методика получения стекла состава $\text{BaO}\cdot\text{Gd}_2\text{O}_3\cdot 3\text{SiO}_2\cdot\text{Ce}^{3+}$. Стекло DSB:Ce может быть получено из механической смеси всех исходных компонентов сырья [9, 10]. Состав $\text{BaO}\cdot 2\text{SiO}_2$ плавится и достигает необходимой вязкости для выработки при температуре ~1430 °С. В литературе нет полной определенности по точной форме линии ликвидуса со стороны, обогащенной SiO_2 относительно данной фазы, однако при снижении количества SiO_2 падение температуры плавления в точке эвтектики минимально, и в целом наблюдается уверенный рост температуры плавления системы. В данном исследовании состав (Gd–Ba)-содержащего стекла был выбран комбинированием двух известных стехиометрических составов – упомянутого выше DSB и ортосиликата гадолиния (Gd_2SiO_5 , $\text{Gd}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$, температура плавления – около 1900 °С), аналога известного кристаллического сцинтиллятора [1]. Состав композиции результирующего стекла был $\text{BaO}\cdot\text{Gd}_2\text{O}_3\cdot 3\text{SiO}_2\cdot\text{Ce}$, а его ожидаемая температура плавления была оценена как 1520 °С.

Для сохранения активирующего иона Се в трехвалентном состоянии в шихту добавлялся восстановитель в виде SiC в количестве 0,2 мас.% [8].

Использование описанных выше приемов позволило синтезировать методом закалки расплава образцы стекла объемом до 20 см³. В результате были получены бесцветные стекла, обладающие интенсивной люминесценцией в голубой области спектра (рис. 1).

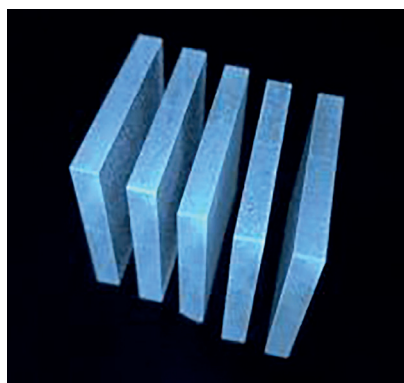


Рис. 1. Фотографии образцов сцинтилляционных элементов при освещении излучением 360 нм

Fig. 1. Photos of samples of scintillation elements under illumination with radiation of 360 nm

Спектрально-люминесцентные свойства Ba–Gd–Si, активированного ионами Се. Измерения радиolumинесценции (РЛ) при возбуждении рентгеновским излучением и с источником нейтронов Am–Be проводились в кооперации с участниками Crystal Clear Collaboration (ЦЕРН). Спектры РЛ записывали с помощью монохроматора Sincerity, Jobin Yvon (с решеткой 234 штрихов/мм), с детектором типа Charge Coupled Device (CCD). РЛ возбуждали рентгеновским излучением с использованием трубки Philips PW2274, работающей при 20 кВ и 20 мА.

Измерения временного разрешения совпадений были выполнены при комнатной температуре с использованием образцов стекол $2 \times 2 \times 5 \text{ мм}^3$, установленных на кремниевые фотомножители (SiPM) HPK S13360 3050PE, Hamamatsu с эффективностью фоторегистрации ~60 % при 410 нм и источника коррелированных аннигиляционных гамма-квантов ^{22}Na . Аналогичная методика, также называемая «старт-стоп» с применением вакуумных фотомножителей Philips XR2020, применялась для измерения кинетики сцинтилляций, а для измерения кинетики фотolumинесценции использовался спектрофлуориметр.

Нормированные спектры радиolumинесценции исследованных образцов представлены на рис. 2. В широком диапазоне температур спектры состоят из полосы с максимумом при 410 нм, обусловленной переходами $5d_1 \rightarrow {}^2F_{5/2,7/2}$ в Ce^{3+} . Дополнительная полоса излучения с максимумом 313 нм наблюдается рядом с основной полосой излучения Се при низких температурах (см. спектр при 10 К на рис. 2). Эта полоса обусловлена электронным переходом между состояниями ${}^6P-{}^8S$ ионов Gd^{3+} . Второй порядок полосы наблюдается при 626 нм. Тушение люминесценции Gd^{3+} при повышенных температурах подтверждает эффективную передачу электронных возбуждений от подсистемы Gd^{3+} к активаторным ионам Ce^{3+} .

В стекле, в отличие от монокристаллов, повышенная концентрация активатора ионов Се является необходимым условием получения максимального выхода сцинтилляции, поэтому проблема окисления Се в расплаве при высокой температуре требует особого внимания. При высоком содержании Се в стекле часть его окисляется до состояния Ce^{4+} , что может привести к коричневому окрашиванию стекла из-за широкой бесструктурной полосы поглощения в видимом диапазоне. Присутствие Ce^{4+} приводит к падению световыхода сцинтилляции за счет перепоглощения сцинтилляционного света, как ранее установлено нами для литий-силикатных стекол [5].

Сравнение кинетики фотolumинесценции и сцинтилляции, измеренное при комнатной температуре, представлено в табл. 1.

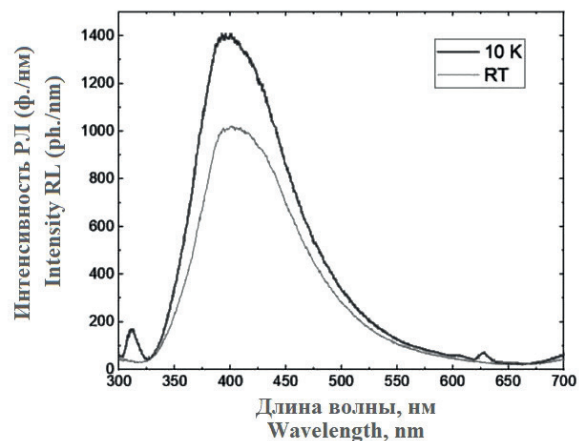
Таблица 1. Параметры кинетики фотolumинесценции, сцинтилляции и временного разрешения совпадений, полученные с образцами стекла $\text{BaO}\cdot\text{Gd}_2\text{O}_3\cdot 3\text{SiO}_2\text{:Ce}$, измеренные при комнатной температуре

Table 1. The parameters of the photoluminescence kinetics, scintillation, and coincidence time resolution obtained with $\text{BaO}\cdot\text{Gd}_2\text{O}_3\cdot 3\text{SiO}_2\text{:Ce}$ glass samples measured at room temperature

Константа затухания кинетики люминесценции, возбуждение 340 нм, нс	Константа затухания кинетики сцинтилляций, доля в кинетике, нс (%)	Временное разрешение совпадений, измеренное с аннигиляционными гамма-квантами 511кэВ, пс (%)
50	90 (45) 400 (55)	215

Рис. 2. Спектры радиolumинесценции стекла $\text{BaO}\cdot\text{Gd}_2\text{O}_3\cdot 3\text{SiO}_2\text{:Ce}$ при 300 и 10 К

Fig. 2. Radioluminescence spectra of $\text{BaO}\cdot\text{Gd}_2\text{O}_3\cdot 3\text{SiO}_2\text{:Ce}$ glass at 300 and 10 K



Фотолюминесценция показывает моноэкспоненциальное затухание с постоянной времени 50 нс. Между тем затухание сцинтилляции происходит значительно медленнее, его можно описать двумя компонентами с сопоставимыми вкладами: быстрой составляющей с постоянной времени 90 нс (45 %) и медленной составляющей с постоянной времени 400 нс (55 %). Полученное значение временного разрешения всего в два раза больше, чем значение, получаемое с кристаллами $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$, которые широко применяются в новейших сканерах позитронно-эмиссионной томографии [11].

Амплитудный спектр, измеренный с ^{137}Cs источником γ -квантов (662 кэВ) и зависимость выхода сцинтилляций от времени интегрирования сигнала при различных температурах приведены на рис. 3. При времени интегрирования 4 мкс коэффициент изменения световыхода от температуры в указанном диапазоне температур составил 0,3 % / $^{\circ}\text{C}$. Значение световыхода приведено в фотоэлектронах, учитывая эффективность фоторегистрации ФЭУ около 20 %, можно оценить световыход стекла величиной 2500 фот/МэВ. Полученный результат по световыходу сцинтилляций является наилучшим для тяжелых сцинтилляционных стекол, имеющих к настоящему времени.

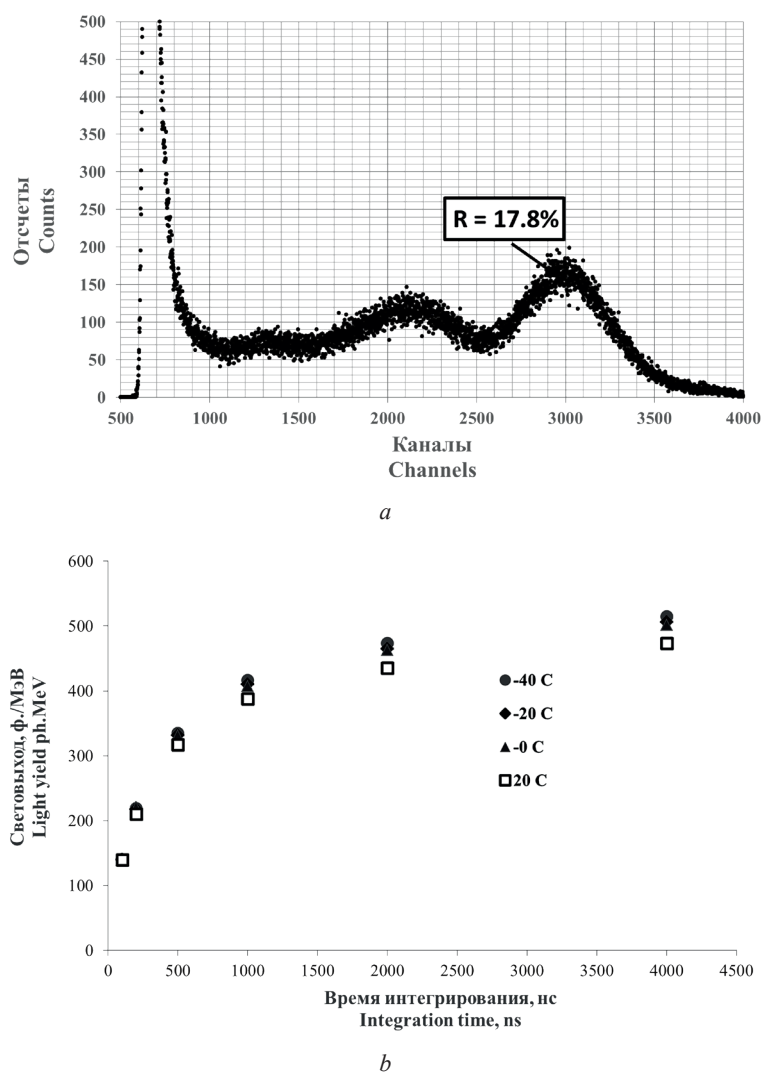


Рис. 3. Амплитудный спектр (*a*), измеренный с ^{137}Cs источником γ -квантов с образцом с содержанием Gd_2O_3 и CeO_2 20 и 0,5 мас.% в композиции стекла Ba–Gd–Si и температурная зависимость световыхода (*b*) от времени интегрирования в тракте регистрации

Fig. 3 The pulse height spectrum of ^{137}Cs γ -quanta measured with Ba–Gd–Si glass (20 weight % of Gd and 0.5 weight % of CeO_2 in the composition) (*a*) and (*b*) the temperature dependence of the gated light yield

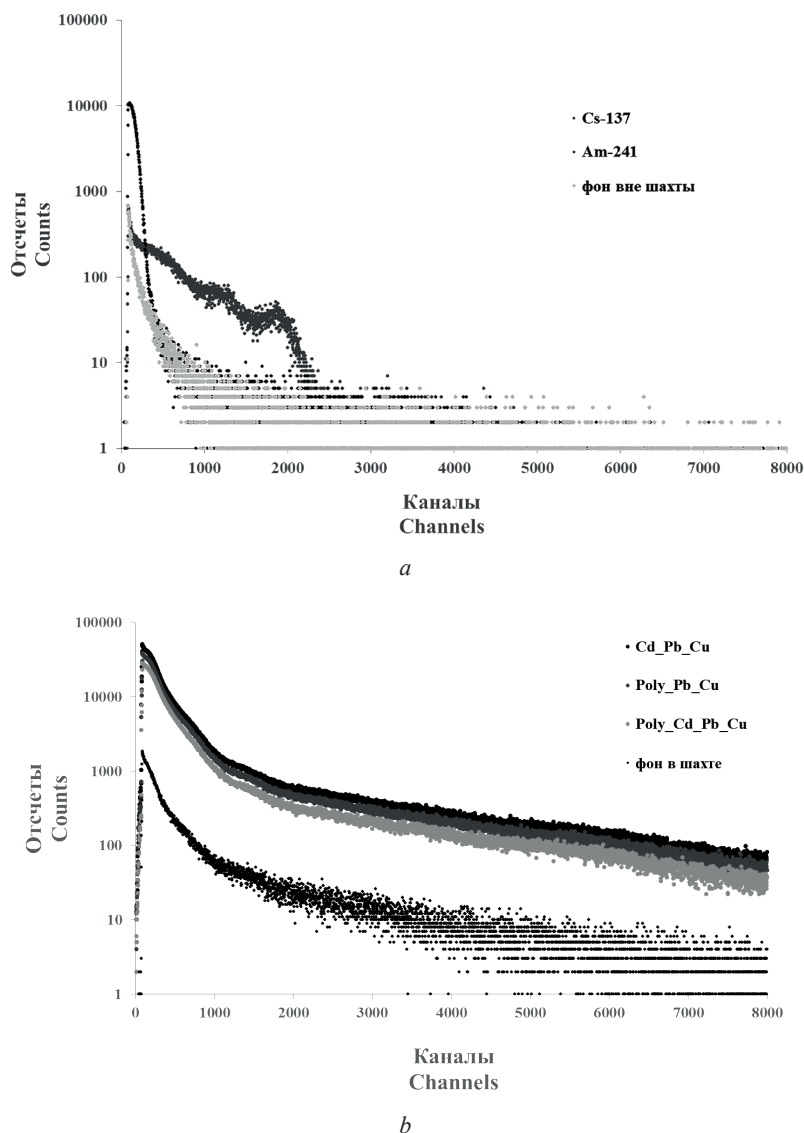


Рис. 4. Спектр фона в лаборатории и амплитудные спектры калибровочных источников (а), спектр фона вблизи шахты с источником нейтронов и продуктов взаимодействия нейтронов в сцинтилляторе, измененный с различными поглотителями и модератором между источником и детектором нейтронов на основе стекла $\text{BaO}\cdot\text{Gd}_2\text{O}_3\cdot 3\text{SiO}_2\cdot\text{Ce}$ (b)

Fig. 4. The background spectrum in the laboratory and the amplitude spectra of the calibration sources (a), the background spectrum near the well with a neutron source and the secondary particles in the scintillator under the neutron source, the flux of which was modified with different absorbers and a moderator between the source and a neutron detector based on $\text{BaO}\cdot\text{Gd}_2\text{O}_3\cdot 3\text{SiO}_2\cdot\text{Ce}$ glass (b)

Регистрация нейтронов детектором на основе стекла композиции $\text{BaO}\cdot\text{Gd}_2\text{O}_3\cdot 3\text{SiO}_2\cdot\text{Ce}$.

Стекло $\text{BaO}\cdot\text{Gd}_2\text{O}_3\cdot 3\text{SiO}_2\cdot\text{Ce}$ представляет большой интерес в качестве дешевого детекторного материала с чувствительностью к нейтронам. Высокое разрешение временных совпадений делает возможной временную дискриминацию для некоторых задач с использованием разности времени пролета нейтронов с различными кинетическими энергиями, а величина световыхода дает возможность регистрировать сигнал нейтронов по мягким гамма-квантам, испускаемым ядрами ^{156}Gd , ^{158}Gd после захвата нейтронов.

Результаты и их обсуждение. В отличие от монокристаллических сцинтилляционных детекторов, обеспечивающих хорошее энергетическое разрешение в области низких энергий гамма-квантов [12], измерение с сцинтиллятором $\text{BaO}\cdot\text{Gd}_2\text{O}_3\cdot 3\text{SiO}_2\cdot\text{Ce}$ обеспечивает существенное превышение над фоном, однако отдельные линии не разрешены. В отсутствие четко выражен-

ных пиков в низкоэнергетической области спектров для оценки эффективности регистрации нейтронов можно применить прямое интегрирование спектра в диапазонах, соответствующих линиям γ -квантов от (n, γ) -реакций с атомами гадолиния.

В табл. 2 представлены интегральные значения отсчетов разных геометрий для интервала энергий 70–200 кэВ.

Таблица 2. Интегральные значения отсчетов для интервала энергий 70–200 кэВ с различными поглотителями и замедлителем между детектором и источником нейтронов

Table 2. Integrals of the counts in the energy range 70–200 keV with different absorbers and a moderator in between the detector and neutron source

№	Геометрия	Интегральное значение событий
1	Фон около шахты с погруженным источником нейтронов	106999
2	Cd, Pb, Cu: Pb-, Cu-поглотители γ -квантов и Cd-фильтр тепловых нейтронов размещены между источником нейтронов и детектором (с вычетом фона)	3911575
3	Poly, Pb, Cu: Pb-, Cu-поглотители γ -квантов и полиэтиленовый замедлитель размещены между источником нейтронов и детектором (с вычетом фона)	3103439
4	Poly, Cd, Pb, Cu: Pb-, Cu-поглотители γ -квантов, Cd-фильтр тепловых нейтронов и полиэтиленовый замедлитель размещены между источником нейтронов и детектором (с вычетом фона)	2363034

Данные, представленные в табл. 2, позволяют оценить возможность регистрации нейтронов при помощи исследуемого образца сцинтилляционного стекла с высоким содержанием гадолиния. Количество событий для геометрии (2) с Pb- и Cu-поглотителями и кадмиевым фильтром тепловых нейтронов представляют собой зарегистрированные γ -кванты от (n, γ) -реакции спектра нейтронов от надтепловых до быстрых источника Am–Be. При добавлении дополнительной пластины модератора (геометрия 3) ожидаемо уменьшается количество событий по причине перераспределения нейтронов в область низких энергий. Уменьшение отсчетов наблюдается при установке кадмиевого фильтра (геометрия 4). Из полученных результатов можно сделать вывод, что исследованный сцинтиллятор наиболее чувствителен к эпитепральным нейтронам и нейтронам высоких энергий, что обусловлено в первую очередь широкой областью резонансов в сечении нейтронов ядер гадолиния ^{155}Gd , ^{157}Gd .

Достоинством стекла выступает относительно низкая плотность в сравнении с гадолиний-содержащими монокристаллами, что делает стекло Ba–Gd–Si:Ce менее чувствительным к фоновым γ -квантам. Следовательно, разработанный сцинтилляционный материал может быть использован в производстве больших экранов для детектирования нейтронов.

Заключение. Разработанное сцинтилляционное стекло, сочетающее атомы Ba, Gd, Si и Ce, демонстрирует высокую чувствительность при регистрации нейтронов в широком диапазоне энергий с высоким временным разрешением. Поэтому разработанный сцинтилляционный материал может быть использован в производстве больших экранов различной формы для детектирования нейтронов. Особый интерес представляют экраны в виде труб большого диаметра для помещения внутрь исследуемых объектов. Это позволит сделать существенный шаг в увеличении производительности нейтронных диагностических методов за счет использования для регистрации геометрии, близкой к 4 π , и открывает перспективу создания нейтронных 3D-сканеров.

Список использованных источников

1. Lecoq, P. Inorganic Scintillators for detecting systems / P. Lecoq, A. Gektin, M. Korzhik. – Springer, 2017. – 408 p.
2. Коржик, М. В. Стеклокерамические материалы для регистрации нейтронов / М. В. Коржик // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2018. – № 4. – С. 67–71.
3. Detection of neutrons in a wide energy range with crystalline $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$, Lu_2SiO_5 and LaBr_3 doped with Ce scintillators / M. Korzhik [et al.] // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. – 2019. – Vol. 931. – P. 88–91. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.04.034>
4. Sensitivity of GAGG based scintillation neutron detector with SiPM readout / A. Fedorov [et al.] // Nucl. Eng. Technol. – 2020. – Vol. 52, № 10. – P. 2306–2312. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.03.012>
5. Scintillation efficiency of binary $\text{Li}_2\text{O}-2\text{SiO}_2$ glass doped with Ce^{3+} and Tb^{3+} ions / Y. Tratsiak [et al.] // J. Alloys Compd. – 2018. – Vol. 735. – P. 2219–2224. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.386>

6. Li-Based glasses for neutron detection – classic material revisited / G. Dosovitskiy [et al.] // *Rev. J. Chem.* – 2020. – Vol. 10, № 1/2. – P. 1–11. <https://doi.org/10.1134/s207997802001001x>
7. DSB: Ce³⁺ scintillation glass for future / E. Auffray [et al.] // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2015. – Vol. 587. – P. 012062. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/587/1/012062>
8. Distribution of luminescent centers in Ce³⁺-ion doped amorphous stoichiometric glass BaO–2SiO₂ and dedicated glass ceramics / M. Korzhik [et al.] // *Opt. Mater.* – 2015. – Vol. 47. – P. 129–134. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2015.07.014>
9. Thermodynamic modeling of the BaO–SiO₂ and SrO–SiO₂ binary melts / A. Romero-Serrano [et al.] // *Glass Phys. Chem.* – 2010. – Vol. 36, № 2. – P. 171–178. <https://doi.org/10.1134/s1087659610020045>
10. Zhang, R. A thermodynamic assessment of the BaO–MgO, BaO–CaO, BaO–Al₂O₃ and BaO–SiO₂ systems [Electronic Resource] / R. Zhang, P. Taskinen // Aalto University. – 2014. – Mode of access: <https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/12848/isbn9789526056135.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
11. Experimental time resolution limits of modern SiPMs and TOF-PET detectors exploring different scintillators and Cherenkov emission / S. Gundacker [et al.] // *Phys. Med. Biol.* – 2020. – Vol. 65, № 2. – P. 025001. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/ab63b4>
12. Временные и спектральные характеристики детекторов на основе неорганического сцинтиллятора Ce: ГАГГ при использовании вакуумных и кремниевых фотоприемников / В. Богомолов [и др.] // *Приборы и техника эксперимента.* – 2020. – № 5. – С. 23–21.

References

1. Lecoq P., Gektin A., Korzhik M., *Inorganic Scintillators for Detecting Systems*, Springer, 2017. 408 p.
2. Korzhik M. V. Glass-ceramic materials for neutron registration. *Vestsi Natsyional'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2018, no.4, pp. 67–71 (in Russian).
3. Korzhik M., Brinkmann K.-Th., Dosovitskiy G., Dormenev V., Fedorov A., Komar D., Kozemiakin V., Kozlov D., Mechinsky V., Zaunick H.-G., Yashin I., Iyudin A., Bogomolov V., Svertilov S., Maximov I. Detection of neutrons in a wide energy range with crystalline Gd₃Al₂Ga₃O₁₂, Lu₂SiO₅ and LaBr₃ doped with Ce scintillators. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 2019, vol. 931, pp. 88–91. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.04.034>
4. Fedorov A., Gurinovich V., Guzov V., Dosovitskiy G., Korzhik M., Kozhemyakin V., Lopatik A., Kozlov D., Mechinsky V., Retivov V. Sensitivity of GAGG based scintillation neutron detector with SiPM readout. *Nuclear Engineering and Technology*, 2020, vol. 52, no. 10, pp. 2306–2312. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.03.012>
5. Tratsiak Y., Fedorov A., Dosovitskiy G., Akimova O., Gordienko E., Korzhik M., Mechinsky V., Trusova E. Scintillation efficiency of binary Li₂O–2SiO₂ glass doped with Ce³⁺ and Tb³⁺ ions. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, vol. 735, pp. 2219–2224. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.386>
6. Dosovitskiy G., Akimova O., Amelina A., Belus S., Fedorov A., Karpyuk P., Kozlov D., Mechinsky V., Mikhlin A., Retivov V., Smyslova V., Volkov P., Korzhik M. Li-Based glasses for neutron detection – classic material revisited. *Review Journal of Chemistry*, 2020, vol. 10, no. 1–2, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1134/s207997802001001x>
7. Auffray E., Akchurin N., Benaglia A., Borisevich A., Cowden C., Damgov J., Dormenev V., Dragoiu C., Dudero P., Korzhik M., Kozlov D., Kunori S., Lecoq P., Lee S. W., Lucchini M., Mechinsky V., Pauwels K. DSB: Ce³⁺ scintillation glass for future. *Journal of Physics: Conference Series*, 2015, vol. 587, pp. 012062. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/587/1/012062>
8. Korzhik M. V., Vaitkevicius A., Dobrovolskas D., Tret'yak E. V., Trusova E., Tamulaitis G. Distribution of luminescent centers in Ce³⁺-ion doped amorphous stoichiometric glass BaO–2SiO₂ and dedicated glass ceramics. *Optical Materials*, 2015, vol. 47, pp. 129–134. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2015.07.014>
9. Romero A., Cruz A., Zeifert B. H., Hallen-Lopez M. Thermodynamic modeling of the BaO–SiO₂ and SrO–SiO₂ binary melts. *Glass Physics and Chemistry*, 2010, vol. 36, no. 2, pp. 171–178. <https://doi.org/10.1134/s1087659610020045>
10. Zhang R., Taskinen P. A thermodynamic assessment of the BaO–MgO, BaO–CaO, BaO–Al₂O₃ and BaO–SiO₂ systems. *Aalto University*. 2014. Available at: <https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/12848/isbn9789526056135.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
11. Gundacker S., Turtos R. M., Kratochwil N., Pots R. H., Paganoni M., Lecoq P., Auffray E. Experimental time resolution limits of modern SiPMs and TOF-PET detectors exploring different scintillators and Cherenkov emission. *Physics in Medicine & Biology*, 2020, vol. 65, no. 2, pp. 025001. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/ab63b4>
12. Bogomolov V., Dosovitskiy G., Iyudin A., Korzhik M., Tikhomirov S., Svertilov S., Kozlov D., Yashin I. The Timing and Spectral Characteristics of Detectors Based on a Ce:GAGG Inorganic Scintillator Using Photomultiplier Tubes and Silicon Photodetectors. *Pribory i tekhnika experimenta = Instruments and experimental technique*, 2020, vol. 63, no. 5, pp. 633–640. <https://doi.org/10.1134/s0020441220050097>

Информация об авторе

Коржик Михаил Васильевич – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета (ул. Бобруйская, 11, 220030, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: korzhik@inp.bsu.by

Information about the author

Mikhail V. Korzhik – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory, Institute of Nuclear Problems of the Belarus State University (11, Bobruiskaya Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: korzhik@inp.bsu.by