

УДК 539.1.074.3

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МОДУЛЯ $\text{Lu}_2\text{SiO}_{5-z}:\text{Y}^{3+}:\text{Ce}^{3+}:\text{Ca}^{2+}$

А. И. Загуменный¹, М. В. Белов², В. И. Власов¹, Ю. Д. Заварцев¹,
М. В. Завертяев², В. А. Козлов², Н. В. Пестовский², С. Ю. Савинов²,
В. С. Цхай²

Исследованы оптические и сцинтилляционные характеристики модуля прототипа электромагнитного калориметра на основе кристалла $\text{Lu}_2\text{SiO}_{5-z}:\text{Y}^{3+}:\text{Ce}^{3+}:\text{Ca}^{2+}$ с размерами $20 \times 20 \times 90$ мм³, выращенного методом Чохральского. Измерено время высвечивания кристаллического модуля под действием возбуждения гамма-квантов от источника ^{137}Cs . Для оценки энергетического разрешения кристаллического модуля было проведено его моделирование с помощью программы GEANT4.

Ключевые слова: сцинтилляционный кристалл, гамма-излучение, время затухания сцинтилляций, энергетическое разрешение.

Разработка новых высокоплотных кристаллов-сцинтилляторов, которые можно использовать в условиях высоких радиационных нагрузок, актуальна как для работающих на современных коллайдерах электромагнитных калориметрах, так и для использования на ускорительных комплексах, создание которых планируется в ближайшие годы. Одними из перспективных сцинтилляторов являются кристаллы на основе оксиортосиликата лютеция (LSO и LSO). Сцинтилляционные кристаллы LSO(CeLuSiO) впервые были исследованы С. L. Melcher и J. S. Schweitzer в 1992 г. как новые материалы для использования в гамма-детекторах [1], кристаллы LYSO (Ce(Lu,Y)SiO) были выращены и исследованы D. W. Cooke в 2000 г. [2].

Технология выращивания кристаллов оксиортосиликата лютеция $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}^{3+}$ и $\text{Lu}_2\text{SiO}_{5-z}:\text{Ce}^{3+}:\text{Ca}^{2+}$ методом Чохральского впервые была предложена в работе Заварцева и др. [3].

¹ ИОФ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38.

² ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: kozlovva@lebedev.ru.

Радиационно стойкий кристаллический сцинтиллятор на основе оксиортосиликата лютеция LFS-3 ($\text{Ce}_x\text{Lu}_{2+2y-x-z}\text{A}_z\text{Si}_{1-y}\text{O}_{5+y}$, где А – по крайней мере один элемент из группы Ca, Gd, Sc, Y, La, Eu и Tb) был исследован нами в 2013 г. с целью использования в электромагнитной калориметрии [4]. В работе [5] показано, что легирование кристаллов LSO:Ce ионами Ca^{2+} приводит к увеличению абсолютного световыхода и уменьшению постоянной времени высвечивания. В нашей работе [6] было проведено сравнение монокристаллического, порошкового и композиционного сцинтилляторов-оксиортосиликатов.

Данная статья посвящена исследованию сцинтилляционных свойств модуля нового промышленного кристалла $\text{Lu}_2\text{SiO}_{5-z}:\text{Y}^{3+}:\text{Ce}^{3+}:\text{Ca}^{2+}$, перспективного для использования в современных электромагнитных калориметрах.

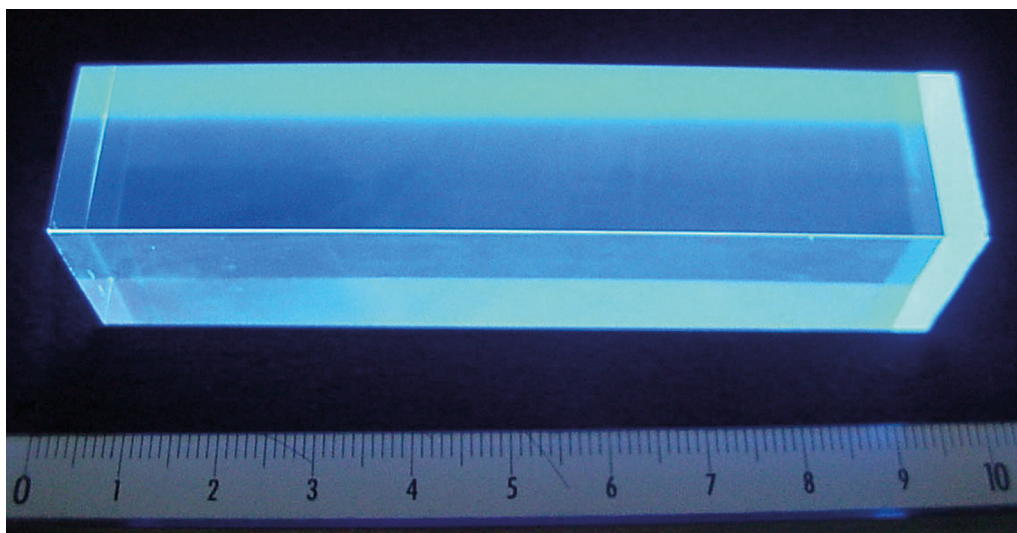


Рис. 1: Фотография модуля кристалла $\text{Lu}_2\text{SiO}_{5-z}:\text{Y}^{3+}:\text{Ce}^{3+}:\text{Ca}^{2+}$.

Высокоэффективные кристаллы $\text{Lu}_2\text{SiO}_{5-z}:\text{Y}^{3+}:\text{Ce}^{3+}:\text{Ca}^{2+}$ (LYSO с химической формулой соединения $\text{Lu}_{(2-y)}\text{Y}_{(y-z-x)}\text{Ce}_x\text{Ca}_z\text{SiO}_{5-z}$, концентрацией иттрия $\text{Y}_{0.05}$, плотностью 7.36 г/см^3 , эффективным атомным номером $Z = 63.7$) были выращены из 70-85% исходного расплава с использованием метод Чохральского. Оптимизация параметров процесса выращивания и состава исходного расплава позволила вырастить кристаллические булы диаметром $75 \div 80 \text{ мм}$ [7]. Для проведения измерений оптических и сцинтилляционных характеристик были изготовлены наборы полированных образцов кристаллов с размерами $20 \times 20 \times 1.5 \text{ мм}^3$ и $22 \times 22 \times 5 \text{ мм}^3$, а также калориметрический модуль размером $20 \times 20 \times 90 \text{ мм}^3$ (рис. 1). В кристалле LYSO производства Saint Gobain

($\text{Lu}_{1.8}\text{Y}_{0.2}\text{SiO}_5:\text{Ce}$) для медицинских томографов концентрация иттрия в 4 раза выше в сравнении с исследуемым кристаллом, вследствие чего плотность и эффективный атомный номер уменьшаются до 7.10 г/см^3 и $Z = 63.4$, соответственно.

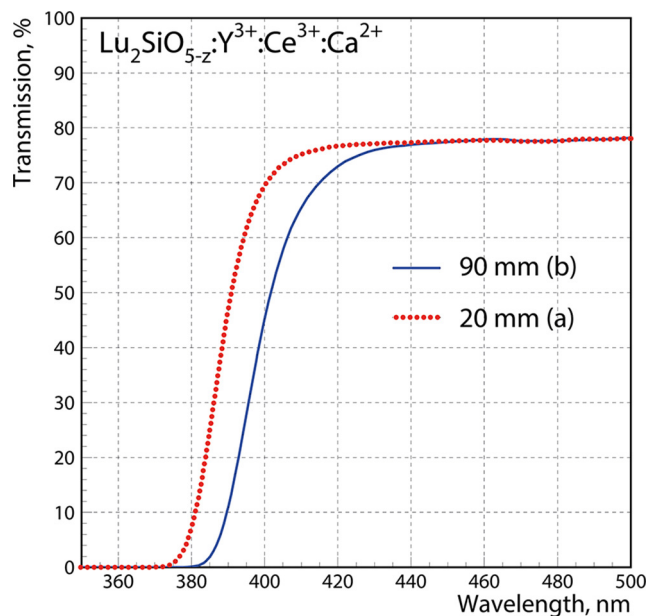


Рис. 2: Спектры пропускания кристалла $\text{Lu}_2\text{SiO}_{5-z}:\text{Y}^{3+}:\text{Ce}^{3+}:\text{Ca}^{2+}$: (a) в поперечном направлении (20 мм), (b) по продольной оси модуля (90 мм).

Спектры оптического пропускания образцов толщиной 1.5 мм, 5 мм и 90 мм измерялись спектрофотометром Shimadzu UV-3101PC в интервале $350 \div 500 \text{ нм}$ (рис. 2).

Для измерения амплитудных распределений (фотопиков) от кристаллического модуля $\text{Lu}_2\text{SiO}_{5-z}:\text{Y}^{3+}:\text{Ce}^{3+}:\text{Ca}^{2+}$ использовались гамма-кванты от источника ^{137}Cs . Исследуемый сцинтилляционный кристалл был соединен с фотоумножителем (ФЭУ) Hamamatsu R4125Q с кварцевым окном с помощью оптической смазки Dow Corning Q2-3067. Все остальные поверхности кристалла были завернуты в один слой алюминизированного майлара.

Сигнал от фотоумножителя через предусилитель Canberra 2007B поступал на спектрометрический усилитель POLON 1101, и далее на амплитудно-цифровой преобразователь (АЦП) Schlumberger JCAN-21C, конвертировавший его в относительные единицы – каналы АЦП. Таким образом номер канала АЦП прямо пропорционален энергии сцинтилляционного сигнала. На рис. 3 приведен пик сцинтилляционного сигнала при облучении кристалла $\text{Lu}_2\text{SiO}_{5-z}:\text{Y}^{3+}:\text{Ce}^{3+}:\text{Ca}^{2+}$ гамма-квантами от радиоактивного источника ^{137}Cs .

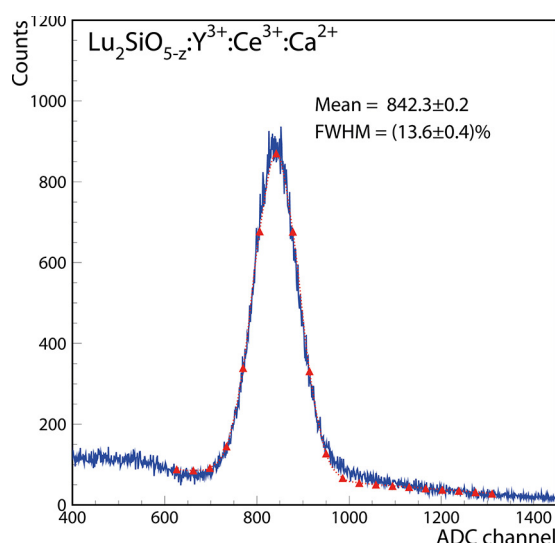


Рис. 3: Амплитудное распределение (в каналах АЦП) сцинтилляционного сигнала от кристалла $\text{Lu}_2\text{SiO}_{5-z}:\text{Y}^{3+}:\text{Ce}^{3+}:\text{Ca}^{2+}$, облученного гамма-квантами от источника ^{137}Cs .

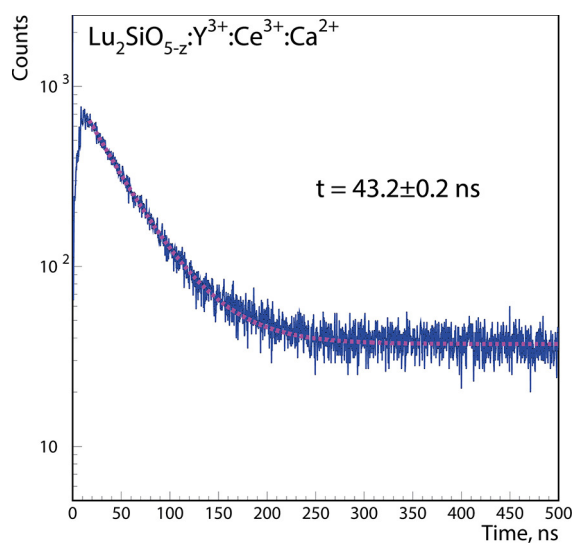


Рис. 4: Спектр времени высвечивания сцинтиллятора $\text{Lu}_2\text{SiO}_{5-z}:\text{Y}^{3+}:\text{Ce}^{3+}:\text{Ca}^{2+}$ $20 \times 20 \times 90 \text{ мм}^3$.

Времена высвечивания кристаллов LYSO исследовались с использованием метода “задержанных совпадений”, который заключается в измерении распределения временных интервалов Δt между возбуждением в сцинтиляторе и образованием фотоэлектрона на фотокатоде ФЭУ. Временное распределение измерялось относительно сигнала

“Старт”, который получался от исследуемого кристалла, присоединенного к фотоумножителю Hamamatsu R4125Q. Сигнал “Стоп” формировался ФЭУ R4125Q, присоединенным к противоположному торцу кристалла. Диафрагма перед этим ФЭУ позволяла регулировать световой поток от сцинтиллятора для того, чтобы система работала в режиме счета фотонов. Кристалл облучался гамма-квантами от источника ^{137}Cs . Сигналы с фотоумножителей каналов “Старт” и “Стоп” через предусилители поступали на дискриминаторы со следящим порогом CAEN C808 и далее на 2048-канальный времяцифровой преобразователь КА-317, информация с которого считывалась в память персонального компьютера. Зависимость интенсивности высвечивания от времени для модуля LYSO приведена на рис. 4. Для определения параметров временного спектра использовалась функция вида $I = I_0 + I_1 \cdot e^{(-t/\tau)}$, где τ – время высвечивания сцинтиллятора, за которое интенсивность светового излучения уменьшается в e -раз, I_0 , I_1 – интенсивности высвечивания. При облучении противоположного от ФЭУ торца кристаллического модуля было получено время высвечивания кристалла 43.2 ± 0.2 нс.

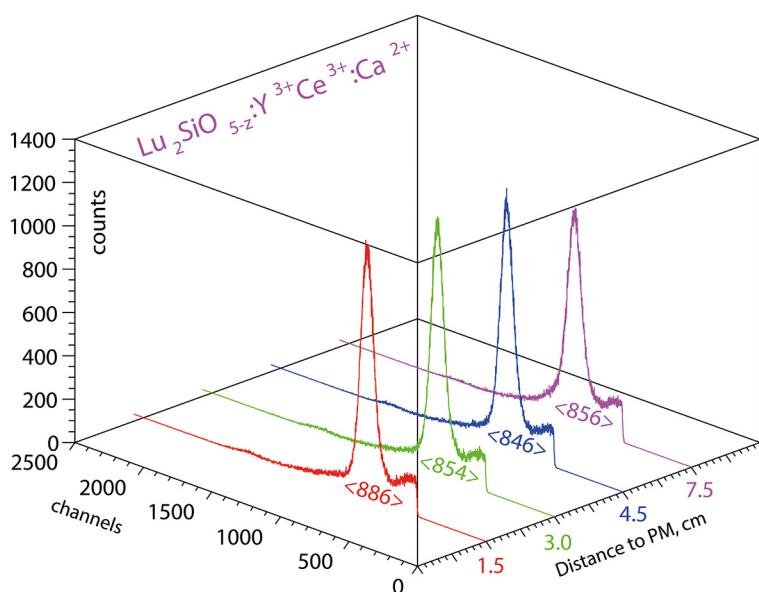


Рис. 5: Амплитудное распределение модуля $\text{Lu}_2\text{SiO}_{5-z}:\text{Y}^{3+}:\text{Ce}^{3+}:\text{Ca}^{2+}$ в зависимости от расстояния между источником ^{137}Cs и фотоумножителем.

Для изучения однородности отклика были измерены амплитудные распределения при облучении модуля источником ^{137}Cs в четырех точках, распределенных вдоль оси кристалла (рис. 5). Из полученных данных следует, что систематическая ошибка измерения однородности отклика не превышает 3%.

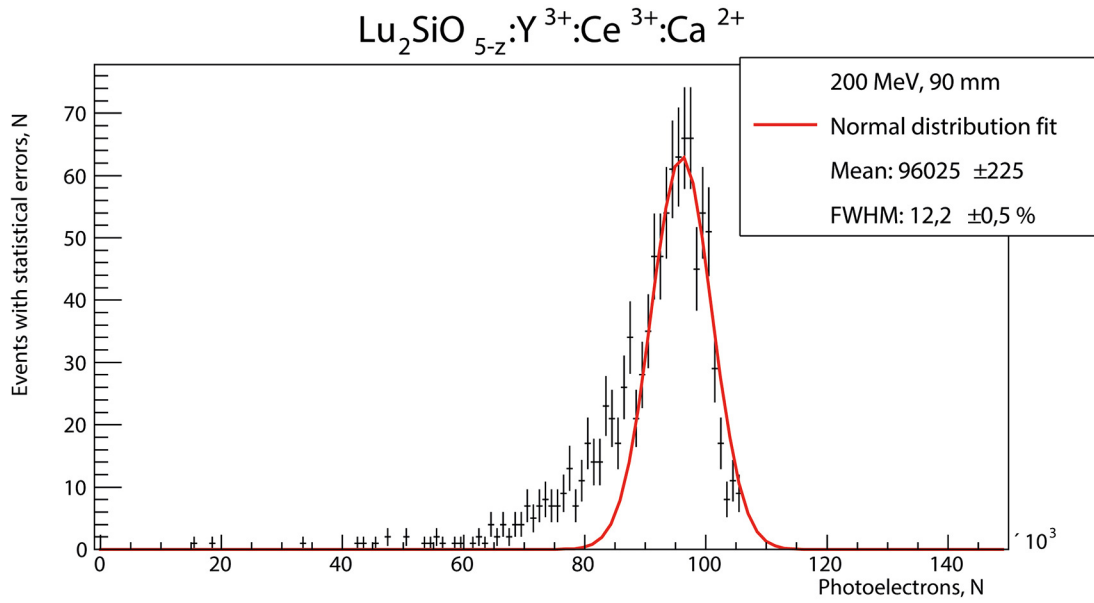


Рис. 6: Распределение числа событий по количеству фотоэлектронов, полученных при облучении кристаллического модуля $\text{Lu}_2\text{SiO}_{5-z}:\text{Y}^{3+}:\text{Ce}^{3+}:\text{Ca}^{2+}$ электронами с энергией 200 МэВ.

Для оценки энергетического разрешения модуля прототипа электромагнитного калориметра на основе кристалла $\text{Lu}_2\text{SiO}_{5-z}:\text{Y}^{3+}:\text{Ce}^{3+}:\text{Ca}^{2+}$ было проведено моделирование кристаллов LYSO квадратного сечения $10 \times 10 \text{ см}^2$ и длиной 9 см с помощью программы GEANT4 [8]. Оптические свойства кристалла (коэффициент преломления, длины поглощения, спектр и интенсивность сцинтилляции) моделировались на основе лабораторных измерений. Поверхность моделировалась как полированная, обернутая тefлоновой пленкой. В качестве источника был взят тонкий пучок моноэнергетических электронов, падающий в центр передней грани кристалла вдоль его продольной оси. Одним событием считались все процессы от испускания первичного электрона до окончания всех взаимодействий и покиданием вторичными частицами области кристалла. Для взаимодействия первичного электрона и вторичных частиц каскада с кристаллом моделировался процесс сцинтилляции и дальнейшего взаимодействия оптических фотонов с веществом и поверхностью кристалла. При попадании оптического фотона на окно фотоумножителя определялась вероятность произвести фотоэлектрон в зависимости от квантовой эффективности Hamamatsu R4125Q на длине волны фотона. Число фотоэлектронов, полученных при облучении детекторного модуля единичным электроном с энергией 200 МэВ, заносилось в гистограмму. Полученное распределение числа

событий по количеству фотоэлектронов с указанием статистической погрешности и результаты аппроксимации с использованием нормального распределения представлены на рис. 6.

Исследованы оптические и сцинтилляционные характеристики модуля на основе кристалла $\text{Lu}_2\text{SiO}_5\text{-}_z\text{:Y}^{3+}\text{:Ce}^{3+}\text{:Ca}^{2+}$ с целью использования этих кристаллов в электромагнитной калориметрии. С помощью программы GEANT4 рассчитано энергетическое разрешение модуля для энергии электронов 200 МэВ, которое составило $(12.2 \pm 0.5)\%$.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] C. Melcher, J. Schweitzer, IEEE Trans. Nucl. Sci. **39**(4), 502 (1992). DOI: 10.1109/23.159655.
- [2] D. W. Cooke, K. J. McClellan, B. L. Bennett, et al., J. Appl. Phys. **88**, 7360 (2000). <https://doi.org/10.1063/1.1328775>.
- [3] Y. D. Zavartsev, S. A. Koutovoi, A. I. Zagumennyi, J. Cryst. Growth **275**(1–2), e2167 (2005). <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2004.11.290>.
- [4] Ю. Д. Заварцев, М. В. Завертяев, А. И. Загуменный и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **40**(2), 13 (2013). DOI: 10.3103/S1068335613020024.
- [5] M. A. Spurrier, P. Szupryczynski, H. Rothfuss, et al., J. Cryst. Growth **310**, 2110 (2008). DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2007.10.075.
- [6] А. И. Загуменный, М. В. Белов, Ю. Д. Заварцев и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **49**(8), 41 (2022). DOI: 10.3103/S1068335622080085.
- [7] И. М. Ермоченков, Ю. Д. Заварцев, А. И. Загуменный и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **51**(2), 39 (2024). DOI: 10.3103/S1068335623601231.
- [8] J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, et al., Nucl. Instrum. Meth. A **835**, 186 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.125>.

Поступила в редакцию 27 февраля 2025 г.

После доработки 20 июня 2025 г.

Принята к публикации 24 июня 2025 г.