

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НОВЫХ КРИСТАЛЛОВ LuScSiO_5

М. В. Белов¹, Ю. Д. Заварцев², М. В. Завертязев¹, А. И. Загуменный²,
В. А. Козлов¹, С. А. Кутовой², Н. В. Пестовский¹, С. Ю. Савинов¹

Методом Чохральского выращены новые кристаллы LuScSiO_5 , обладающие собственной люминесценцией. Впервые исследованы спектры импульсной катодолюминесценции новых сцинтилляторов и их время высвечивания. Используя γ -кванты с энергией 662 кэВ от источника ^{137}Cs , были получены распределения числа импульсов люминесценции по амплитуде (т. н. фотопики) для новых кристаллов. Показано, что световыход кристаллов LuScSiO_5 составляет 13500 фотонов/МэВ.

Ключевые слова: сцинтилляционные кристаллы, гамма-излучение, время затухания сцинтилляций, импульсная катодолюминесценция.

Хорошо известный сцинтиллятор, легированный церием кристалл оксиортосиликата лютеция Lu_2SiO_5 (LSO), имеет лучшее сочетание большой плотности материала, атомного номера, светового выхода и короткого времени сцинтилляции для использования в позитронно-эмиссионной томографии. Однако при использовании кристаллов LSO/LYSO в гомогенной электромагнитной калориметрии в физике высоких энергий, где используются модули длиной 20–25 см, необходимо учитывать неоднородность световыхода по длине кристалла [1]. Известно, что концентрация активатора – церия – вдоль длинного кристалла неоднородная, и это приводит к неоднородности световыхода и как следствие к ухудшению энергетического разрешения калориметров на основе LSO/LYSO. Поэтому актуально дальнейшее расширение номенклатуры новых оксидных сцинтилляционных кристаллов с собственной люминесценцией, в частности, исследование сцинтилляции ионов скандия Sc^{3+} в кристаллах с кристаллической структурой Lu_2SiO_5 .

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: kozlovva@lebedev.ru.

² ИОФ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38.

Собственная люминесценция кристаллов Sc_2SiO_5 с использованием техники время-разрешенной ВУФ спектроскопии изучалась в работе [2]. Однако плотность кристаллов Sc_2SiO_5 низка (3.49 г/см^3), что существенно ограничивает использование этого сцинтиллятора в физике высоких энергий и ядерной медицине.

Ионные радиусы ионов Lu^{3+} и Sc^{3+} зависят от количества окружающих ионов кислорода [3]. Ионные радиусы Lu^{3+} равны 0.972 \AA (координационное число КЧ=7) и 0.86 \AA (КЧ=6). Ионные радиусы Sc^{3+} равны 0.87 \AA (КЧ=7) и 0.745 \AA (КЧ=6). Близкие значения ионных радиусов позволяют в решетке Sc_2SiO_5 легкий ион Sc^{3+} заместить на тяжелый ион Lu^{3+} , в результате чего в кристалле LuScSiO_5 увеличивается плотность и эффективный атомный номер кристаллического вещества (см. табл. 1), а это увеличивает эффективность поглощения γ -излучения.

Высокочистые вещества Lu_2O_3 (99.99%), Sc_2O_3 (99.995%) и моноизотопный оксид $^{28}\text{SiO}_2$ (содержащий изотоп ^{28}Si в концентрации 99.91 ат.%) были использованы в качестве исходных реактивов. Выращивание кристаллов LuScSiO_5 осуществлялось методом Чохральского из иридиевых тиглей в атмосфере аргона $99.5+0.5\% \text{ O}_2$.

Впервые нами были исследованы сцинтилляционные характеристики новых кристаллов.

Изучение спектров импульсной катодолуминесценции (ИКЛ) проводилось на специальной установке на основе ускорителя электронов РАДАН-ЭКСПЕРТ, генерирующего импульсы электронов со средней энергией 150 кэВ, длительностью 1 нсек, частотой 1 Гц и пиковой плотностью мощности 10 МВт/см^3 [4]. В состав установки входил также спектрограф OCEAN FLAME-S-XR1-ES.

Спектр ИКЛ для кристалла LuScSiO_5 представлен на рис. 1, на котором видна полоса собственной люминесценции с максимумом 320 нм. Интенсивная люминесценция кристалла собственного характера связана с наличием в структуре ионов Sc^{3+} .

При определении времени высвечивания кристалла LuScSiO_5 использовался метод “задержанных совпадений”, который заключается в измерении распределения временных интервалов Δt между возбуждением сцинтиллятора от гамма-квантов радиоактивного источника ^{137}Cs (сигнал фотоумножителя канала “Старт”), и образованием фотоэлектрона на фотокатод ФЭУ канала “Стоп”, работающего в режиме счёта фотонов. Сигналы с ФЭУ Hamamatsu R4125Q каналов “Старт” и “Стоп” поступали на дискриминаторы со следящим порогом CAEN C808 и далее на 1024-канальный времяцифровой преобразователь (TDC) КА-317, информация с которого считывалась в память персонального компьютера. На рис. 2 представлена зависимость числа интервалов от их

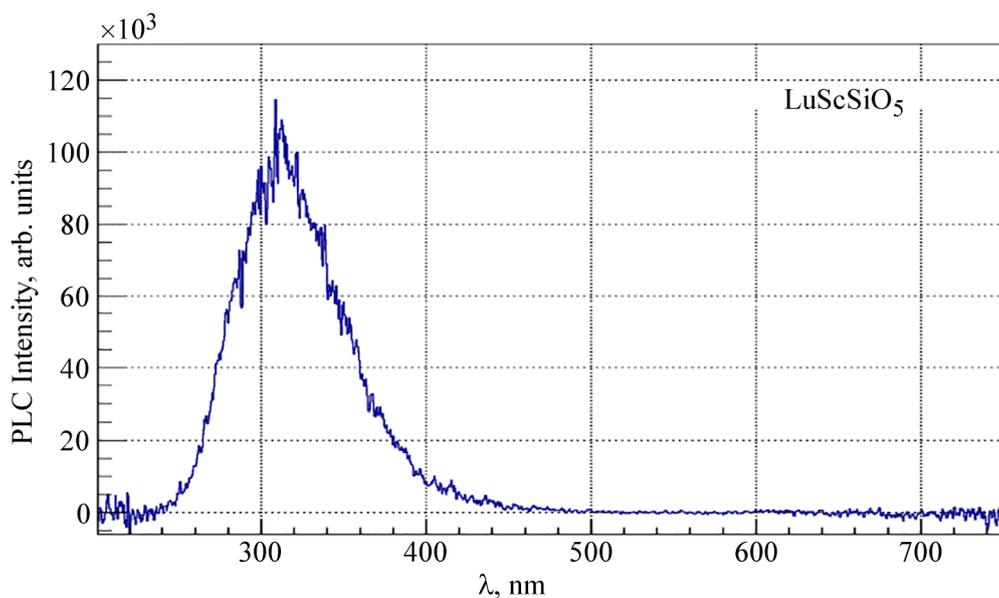


Рис. 1: Спектр импульсной катодолуминесценции (ИКЛ) кристалла LuScSiO_5 .

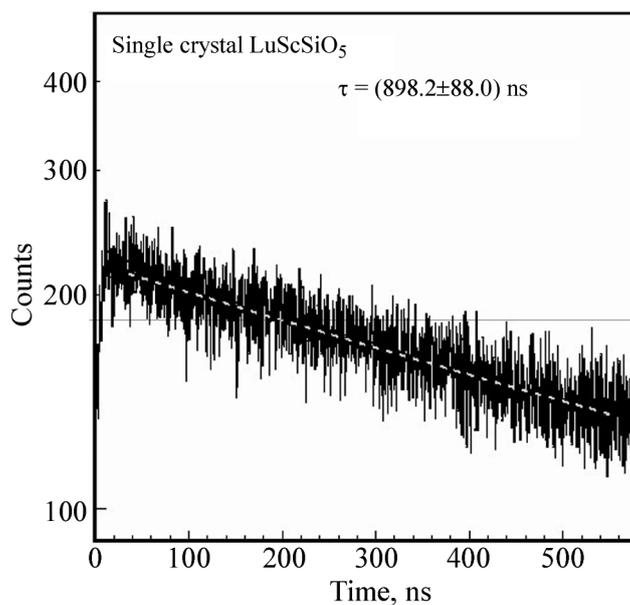


Рис. 2: Зависимость интенсивности высвечивания кристалла LuScSiO_5 от времени.

длительности, соответствующая интенсивности высвечивания от времени, для нового кристалла.

При фитировании временного спектра функцией с одной экспонентой получаем время высвечивания кристалла LuScSiO_5 898.2 ± 88.0 нсек.

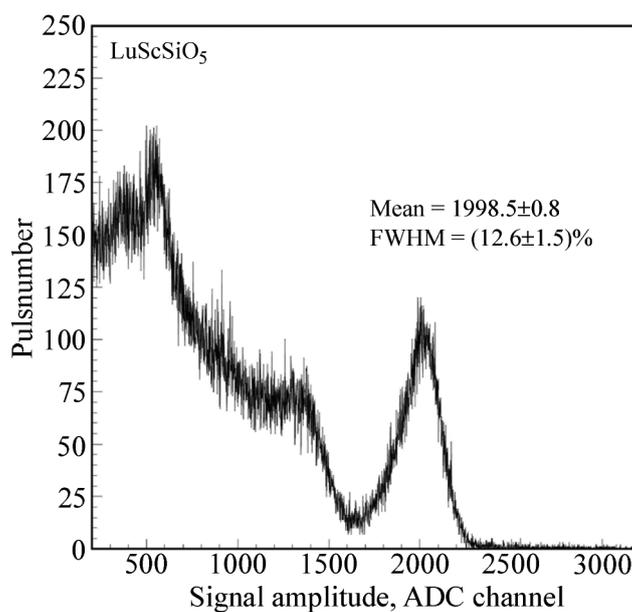


Рис. 3: Амплитудное распределение кристалла LuScSiO_5 , облученного γ -квантами от источника ^{137}Cs .

Для изучения световыхода нового кристалла LuScSiO_5 использовали спектры полного поглощения гамма-квантов (фотопики) от источника ^{137}Cs . Исследуемый сцинтилляционный кристалл с помощью оптической смазки Dow Corning Q2-3067 был соединен с фотоумножителем R4125Q с кварцевым окном. Все остальные поверхности кристалла были завернуты в 8–10 слоев тефлоновой ленты. Размеры образца для исследований световыхода были $5 \times 5 \times 3$ мм³. Сигнал от фотоумножителя через предусилитель Canberra 2007B поступал на спектрометрический усилитель POLON 1101, и далее на АЦП преобразователь ADC Schlumberger JCAN-21C. На рис. 3 приведен фотопик от ^{137}Cs для кристалла LuScSiO_5 .

Для оценки световыхода кристалла LuScSiO_5 использовался хорошо известный сцинтилляционный кристалл CeF_3 , световыход которого равен 2400 фотонов/МэВ [6]. Световыход LuScSiO_5 в терминах фотонов/МэВ определялся путем сравнения положения его фотопики с аналогичным распределением от кристалла CeF_3 . Предполагая, что чувствительность фотоумножителя к высвечиванию CeF_3 и кристалла LuScSiO_5 одинакова из-за близко лежащих их эмиссионных спектров, получаем световыход кристалла LuScSiO_5 , равный 13500 фотонов/МэВ.

Характеристики нового сцинтиллятора LuScSiO_5 в сравнении с известным кристаллом – ортогерманатом висмута $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO) – приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Свойства кристаллов $Bi_4Ge_3O_{12}$ и $LuScSiO_5$

Кристалл	$Bi_4Ge_3O_{12}$	$LuScSiO_5$
Плотность ρ , г/см ³	7.13	5.47
Температура плавления t , °С	1050	1900
Эффективный атомный номер $Z_{эфф}$	75	56
Радиационная длина X_0 , см	1.12	1.9
Световой выход, фотонов/МэВ	8500 ^[6]	13500
Постоянная времени затухания сцинтилляции τ , нс	300	900
Максимум эмиссии λ , нм	480	320
Показатель преломления в максимуме эмиссии	2.15	1.84
Гигроскопичность	нет	нет

Новый неактивированный кристалл $LuScSiO_5$ обладает собственной интенсивной катодолюминесценцией с максимумом при 320 нм. Абсолютный световой выход составил 13500 фотонов/ МэВ и время высвечивания сцинтилляции 900 нсек.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-08-01060).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Jianming Chen, Rihua Mao, Liyuan Zhang and Ren-Yuan Zhu, IEEE Transaction on Nuclear Science **54**(3), 718 (2007). DOI: 10.1109/TNS.2007.897823.
- [2] В. Ю. Иванов, Е. С. Шлыгин, В. А. Пустоваров и др., Физика твердого тела **50**(9), 1628 (2008). DOI: 10.1134/S1063783408090217.
- [3] B. Stroka, P. Holst, W. Tolksdorf, Philips Journal of Research **33**(5/6), 186 (1978). ISSN? 0165-5817.
- [4] V. I. Solomonov, S. G. Michailov, A. I. Lipchak, et al., Laser Physics **16**(1), 126 (2006). DOI: 10.1134/S1054660X06010117.
- [5] A. J. Wojtovicz, M. Balcerzyk, E. Berman and A. Lempicki, Phys. Rev. B **49**(21), 14860 (1994). DOI: 10.1103/PhysRevB.49.14880.

- [6] M. Moszynski, M. Kapusta, M. Mayhugh, et al., IEEE Transaction on Nuclear Science **44**(3), 1052 (1997). DOI: 10.1109/23.603803.

Поступила в редакцию 21 сентября 2020 г.

После доработки 3 февраля 2021 г.

Принята к публикации 4 февраля 2021 г.