

LFS-3 – НОВЫЙ РАДИАЦИОННО СТОЙКИЙ СЦИНТИЛЛЯТОР ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КАЛОРИМЕТРОВ

Ю. Д. Заварцев¹, М. В. Завертяев², А. И. Загуменный¹,
А. Ф. Зерроук³, В. А. Козлов², С. А. Кутовой¹

В работе приводятся результаты исследований оптических и люминесцентных характеристик новых тяжелых сцинтилляционных кристаллов LFS-3. Обсуждается преимущество этих кристаллов по сравнению с известными сцинтилляторами. Радиационная стойкость сцинтилляционных кристаллов LFS-3 изучалась с помощью мощного радиоактивного источника ^{60}Co и протонного пучка с энергией 155 МэВ. Не обнаружены изменения оптического пропускания кристаллов LFS-3 после излучения дозой 23 Мрад.

Ключевые слова: сцинтилляционные кристаллы, электромагнитный калориметр, радиационная стойкость.

Высокие энергии пучков и светимости современных ускорительных комплексов предъявляют повышенные требования к радиационной стойкости материалов, используемых в детекторах экспериментальных установок. Разработка новых высокоплотных кристаллов-сцинтилляторов, которые можно использовать в условиях высоких радиационных нагрузок, актуальна как для работающего в ЦЕРНе электромагнитного калориметра установки Компактный Мюонный Соленоид (CMS), так и для калориметрии на новых линейных коллайдерах (ILC, CLIC), создание которых планируется в ближайшие годы [1]. Так как в экспериментах по физике высоких энергий используются радиаторы длиной 20–25 радиационных длин, то даже небольшое снижение оптического пропускания на единицу длины, возникающее из-за радиационных повреждений,

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

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

³ Zecotek Imaging Systems Pte Ltd, Division of Zecotek Photonics Inc., Vancouver, Canada.

может привести к значительному ухудшению характеристик электромагнитного калориметра. В последнее время было найдено, что модули торцевых частей электромагнитного калориметра CMS, созданные на основе кристаллов PbWO_4 , повреждаются высокоэнергичными адронами в процессе работы коллайдера LHC. По этой причине предполагается замена кристаллов PbWO_4 на радиационно стойкие кристаллы нового поколения.

Одним из перспективных сцинтилляторов являются кристаллы на основе ортосиликата лютеция. Сцинтилляционные кристаллы LSO ($\text{Ce}_x\text{Lu}_{2-x}\text{SiO}_5$) были предложены и исследованы С. L. Melcher и J. S. Schweitzer в 1992 г. как новые материалы для использования в гамма-детекторах [2]. Кристаллы LYSO ($\text{Ce}_x(\text{Lu},\text{Y})_{2-x}\text{SiO}_5$) впервые были выращены и исследованы D. W. Cooke в 2000 г. [3].

Кристаллы LSO и LYSO больших размеров были предложены для использования в экспериментах по физике высоких энергий как перспективные материалы для однородных электромагнитных калориметров [4]. Первый прототип электромагнитного калориметра на основе 3×3 кристаллов LYSO был успешно протестирован на ускорителе МAMI в области энергий фотонов до 490 МэВ [5].

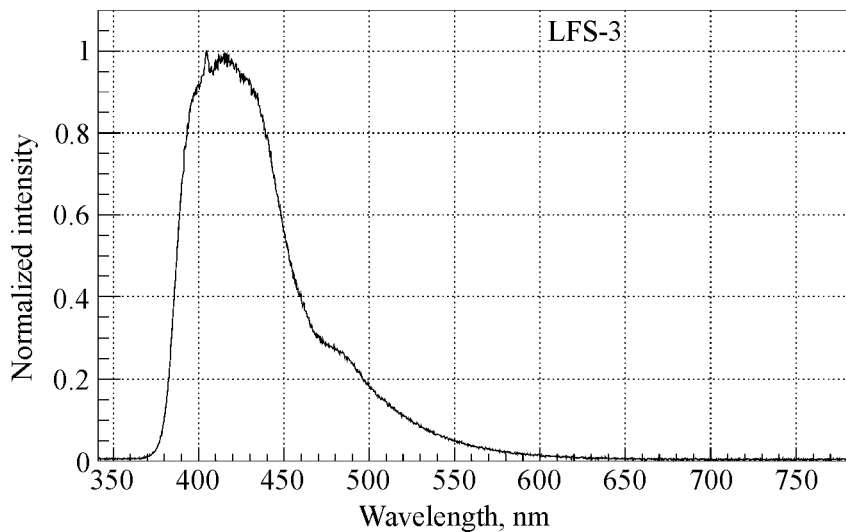


Рис. 1: Рентгенолюминесцентный спектр для кристалла LFS-3.

Радиационная стойкость кристаллов LSO и LYSO при их облучении γ -пучком исследовалась в работах [6, 7]. Было отмечено, что уменьшение оптического пропускания кристалла LSO составило $\sim 2.5\%$ на сантиметр при облучении дозой 10 Мрад от радиоактивного источника ^{60}Co [6].

Недостатком кристаллов LSO является большой разброс параметров при изготовлении образцов из одного и того же исходного кристалла. Кристаллы LYSO обладают похожей неоднородностью сцинтилляционных параметров по длине були, а также имеют тенденцию к растрескиванию.

Новые сцинтилляторы LFS-3 (Lutetium Fine Silicate) были разработаны в Институте общей физики РАН им. А.М. Прохорова на основе кристаллов силикатов лютеция, кристаллизующихся в моноклинную систему с пространственной группой $C2/c$, $Z = 4$. Запатентованный состав LFS-3 $Ce_xLu_{2+2y-x-z}A_zSi_{1-y}O_{5+y}$, где A есть, по крайней мере, один элемент, выбранный из группы, содержащей Ca, Gd, Sc, Y, La, Eu и Tb [8].

Сцинтилляционные кристаллы LFS-3 диаметром 90 мм и длиной 200 мм были выращены фирмой Zecotec Imaging Systems Pte Ltd, используя метод Чохральского. Для получения исходного расплава использовались компоненты Lu_2O_3 , SiO_2 и сцинтилляционная добавка CeO_2 с чистотой 99.99%. Из исходных булей были вырезаны образцы кристаллов LFS-3 для исследования их оптических и люминесцентных характеристик.

Эмиссионный спектр кристаллов LFS-3 (рис. 1) измерялся на установке с возбуждением люминесценции рентгеновскими фотонами с энергией 30 КэВ.

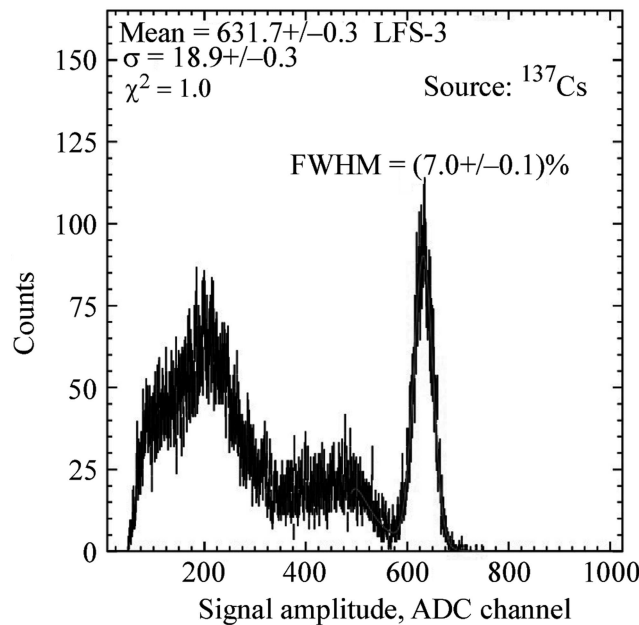


Рис. 2: Амплитудное распределение сцинтиллятора LFS-3, облученного γ -квантами от источника ^{137}Cs .

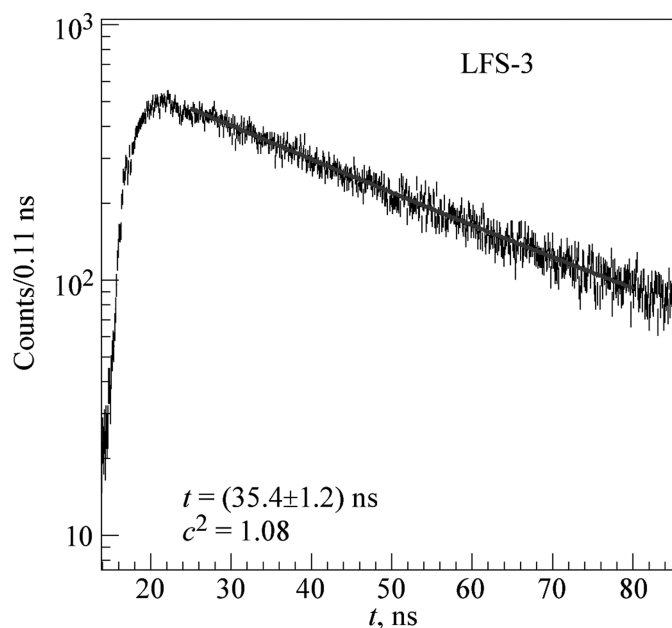


Рис. 3: Зависимость интенсивности высвечивания сцинтиллятора LFS-3 от времени.

Для определения световыхода сцинтилляторов LFS-3 использовались спектры полного поглощения γ -квантов от радиоактивных источников, т.н. фотопики. В данной работе измерение фотопиков сцинтилляторов проводилось на установке, в состав которой входили: фотоумножитель Hamamatsu R4125Q с кварцевым окном, быстрый усилитель ORTEC 579, зарядо-чувствительный амплитудный преобразователь ADC LeCroy 2249W. На рис. 2 представлен фотопик для кристалла LFS-3, сцинтилляции в котором возбуждались γ -квантами от радиоактивного источника ¹³⁷Cs.

Абсолютный световой выход в терминах числа фотоэлектронов/МэВ определялся с помощью калибровки каналов амплитудного преобразователя (ADC), по положению одноэлектронного пика. Используя среднюю квантовую эффективность фотокатода ФЭУ R4125Q в области эмиссионного спектра LFS-3 для конвертирования числа фотоэлектронов/МэВ в выход фотонов, получаем световыход кристаллов LFS-3, равный 38000 фотонов/МэВ.

Время высвечивания сцинтилляторов LFS-3 исследовалось на специальной установке с использованием метода “задержанных” совпадений, который заключается в измерении с помощью времяцифрового преобразователя (TDC) распределения временных интервалов Δt между возбуждением сцинтиллятора и образованием фотоэлектронов на фотокатоде ФЭУ. На рис. 3 приведена зависимость интенсивности высвечивания для

кристалла LFS-3 от времени, полученная с помощью радиоактивного источника ^{22}Na . Для определения параметров временных спектров использовалась функция:

$$I(t) = \sum A_i \cdot \exp(-t/\tau_i) + C,$$

где $\tau_i - i$ – компонента времени высвечивания сцинтиллятора, A_i – ее амплитуда и C – фон случайных совпадений.

Время высвечивания кристалла LFS-3 равно 35.4 ± 1.4 нсек при фитировании временного спектра функцией с одной экспонентой.

Т а б л и ц а 1

Основные характеристики сцинтилляционных кристаллов

Материал	NaI(Tl)	LYSO [9]	LFS-3
Плотность, ρ (g/cm ³)	3.67	7.1	7.35
Точка плавления, (°C)	651	1990	2000
Радиационная длина, X_0 (см)	2.59	1.19	1.15
Радиус Мольера, R_m (см)	4.3	2.16	2.09
Световойход (фотонов/МэВ)	40000	32000	38000
Время высвечивания, (нс)	230	41	35
Максимум эмиссии, (нм)	410	420	425
Показатель преломления n в максимуме эмиссии	1.85	1.81	1.81
Твердость, (Моос)	2	5	5
Гигроскопичность	Да	Нет	Нет

Основные характеристики новых кристаллов LFS-3 в сравнении с кристаллами NaI(Tl) и LYSO представлены в таблице 1. Надо отметить, что LFS-3 является перспективным сцинтилляционным материалом как для электромагнитной калориметрии в экспериментах по физике высоких энергий, так и для позитронно-эмиссионной томографии.

В данной работе проводились исследования устойчивости кристаллов LFS-3 к радиационным повреждениям от заряженных адронов и γ -квантов.

Для измерения радиационной стойкости кристаллов LFS-3 использовались полированные образцы с размерами $10 \times 10 \times 10$ мм³, вырезанные из разных мест исходной булы. Облучение образцов проводилось с использованием радиоактивного источника ^{60}Co (максимальная мощность приблизительно 4 крад/мин). Кристаллы LFS-3 были

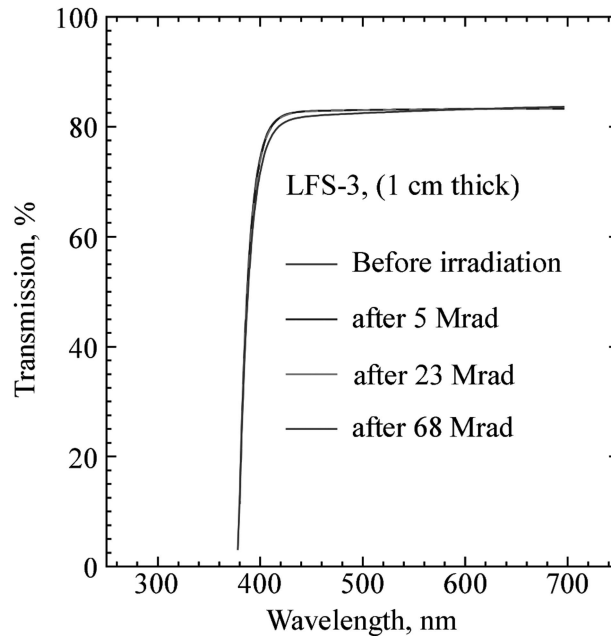


Рис. 4: Спектры оптического пропускания для кристаллов *LFS-3* до и после облучения γ -квантами от радиоактивного источника ^{60}Co .

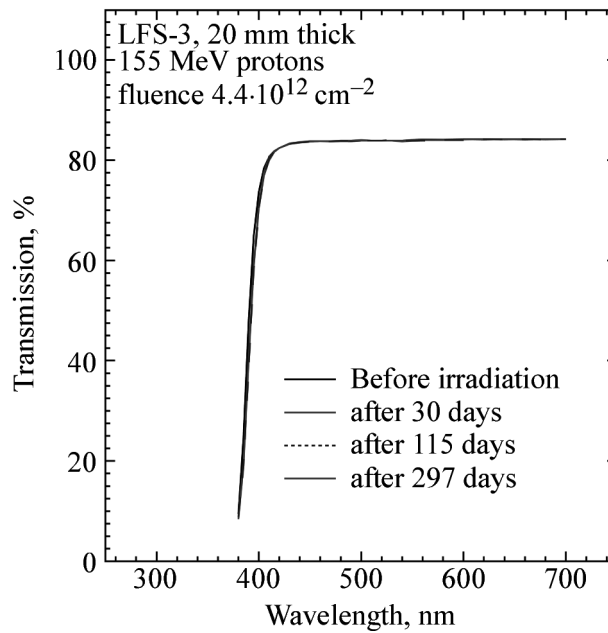


Рис. 5: Спектры оптического пропускания для кристаллов *LFS-3* до и после облучения протонным пучком с энергией 155 МэВ.

последовательно облучены тремя дозами: 5, 23 и 68 Мрад. Спектры оптического пропускания измерялись до и непосредственно после облучения с помощью спектрофотометра Kruss Optronic VIS 6500. Результаты для одного из кристаллов LFS-3 приведены на рис. 4. Анализ спектров пропускания показывает, что для дозы 68 Мрад наблюдается уменьшение в оптическом пропускании на $\sim 2.5\%$ в области эмиссии LFS-3. Для образцов LFS-3, вырезанных из верхней, средней и нижней частей исходного кристалла, доза 23 Мрад не оказывала заметного влияния на оптическое пропускание [10].

Известно, что облучение кристаллов адронами высоких энергий может повреждать кристаллическую решетку и производить значительное число дефектов. Такие повреждения могут не только уменьшать оптическое пропускание кристаллов, но и вносить нарушения в работу сцинтилляционного механизма в кристалле.

Изучение радиационных повреждений кристаллов LFS-3 при их облучении адронами проводилось в протонном пучке синхротрона Института теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ). Для облучения в протонном пучке использовались полированные образцы LFS-3 сечением 11×11 мм² и длиной 20 мм. Кристаллы LFS были упакованы в матрицу 3×2 для одновременного облучения 6 образцов в протонном пучке диаметром 50 мм. Все LFS кристаллы были облучены протонами с энергией 155 МэВ до флюенса $4.4 \cdot 10^{12}$ частиц/см². Из-за высокого уровня наведенной радиоактивности первые измерения оптического пропускания образцов кристаллов, облученных протонами, проводились только через 30 дней после облучения. Спектры оптического пропускания для кристаллов LFS-3 до и после облучения протонным пучком представлены на рис. 5. Следует отметить, что для флюенса $4.4 \cdot 10^{12}$ частиц/см² повреждения кристаллов LFS-3 отсутствуют [11].

Полученные результаты свидетельствуют о том, что новый высокоплотный кристалл-сцинтиллятор LFS-3 является лучшим из кристаллических материалов, предназначенных для электромагнитных калориметров, способных работать в условиях высоких радиационных нагрузок.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] G. Dissertori et al., Nucl. Instr. Meth. **A622**, 41 (2010).
- [2] C. L. Melcher and J. S. Schweitzer, Nucl. Instr. Meth. **A314**, 212 (1992).
- [3] D. W. Cooke et al., J. Appl. Phys. **88**, 7360 (2000).
- [4] J. Chen et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. **54**, 718 (2007).

- [5] M. Thiel et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. **55**, 1425 (2008).
- [6] M. Kobayashi, M. Ishii and C. Melcher, Nucl. Instr. Meth. **A335**, 509 (1993).
- [7] J. Chen et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. **54**, 1319 (2007).
- [8] A. I. Zagumennyi, Yu. D. Zavartsev, S. A. Kutovoi, Patent US 7,132,060, November 7, 2006. PCT Filed: Mar.12,2004.
- [9] www.detectors.saint-gobain.com
- [10] V. Kozlov et al., *LFS-3 – new radiation hard scintillator for electromagnetic calorimeters*. arXiv:0912.0366v1 [physics.ins-det] 2 Dec 2009.
- [11] V. Kozlov et al., *Proton induced damage in LFS-3 and LFS-8 scintillating crystals*. arXiv:1105.4963v1 [physics.ins-det] 25 May 2011.

Поступила в редакцию 18 апреля 2012 г.