

12

Составной модуль электромагнитного калориметра на основе кристаллов BaF_2 и $\text{Lu}_2\text{SiO}_5\text{:Y}^{3+}\text{:Ce}^{3+}\text{:Ca}^{2+}$

© М.В. Завертяев¹, А.И. Загуменный², В.А. Козлов¹, А.С. Мыза³, Н.В. Пестовский¹, С.Ю. Савинов¹, В.С. Цхай¹

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

² Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

³ Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, Москва, Россия

E-mail: vtskhay@lebedev.ru

Поступило в Редакцию 13 апреля 2026 г.

В окончательной редакции 21 мая 2026 г.

Принято к публикации 8 июня 2026 г.

Впервые разработан и изготовлен составной модуль электромагнитного калориметра на основе сцинтилляционных кристаллов BaF_2 и $\text{Lu}_2\text{SiO}_5\text{:Y}^{3+}\text{:Ce}^{3+}\text{:Ca}^{2+}$ (LYSO), в котором пластина LYSO выполняет роль переизлучателя. Переизлучатель преобразует излучение быстрой (~ 0.6 ns) ультрафиолетовой (210–230 nm) кросс-люминесценции BaF_2 в люминесценцию LYSO в области 380–500 nm с временем высвечивания 35 ns и подавляет медленную компоненту собственной люминесценции BaF_2 . Исследованы характеристики модуля под действием гамма-квантов источника ^{137}Cs .

Ключевые слова: сцинтилляционные детекторы, сверхбыстрые сцинтилляторы, физика высоких энергий.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.18.63539.20726

Электромагнитные калориметры используются для измерения энергии электронов и фотонов в экспериментах в области физики высоких энергий. Радиаторы модулей электромагнитного калориметра являются активными детекторами, преобразующими выделенную в нем энергию в сцинтилляционный свет, черенковское излучение или электрический заряд. Как правило, электромагнитные калориметры на базе сцинтилляционных кристаллов обеспечивают лучшее энергетическое разрешение в широком диапазоне энергий. Различные сцинтилляционные и черенковские кристаллы, такие как NaI(Tl) , CsI(Tl) , BGO , PbF_2 , CeF_3 , BaF_2 , PbWO_4 , $\text{NaBi(WO}_4)_2$, уже использовались в электромагнитной калориметрии на ускорительных комплексах. В настоящее время сцинтилляционные кристаллы PbWO_4 используются в многоканальных электромагнитных калориметрах спектрометров CMS и LHC(B) в ЦЕРН.

Целью настоящей работы является исследование оптических и сцинтилляционных характеристик составного модуля электромагнитного калориметра, состоящего из кристаллов BaF_2 и $\text{Lu}_2\text{SiO}_5\text{:Y}^{3+}\text{:Ce}^{3+}\text{:Ca}^{2+}$ (LYSO).

Кристаллы BaF_2 оптически прозрачны в очень широком спектральном диапазоне: от ультрафиолетовой до инфракрасной области спектра (примерно от 0.15 до 12 μm). Это делает их универсальным материалом для различных оптических приложений. Существенным преимуществом кристаллов BaF_2 является их высокая радиационная стойкость, а также низкая стоимость. Оба эти преимущества играют существенную роль для применения в физике высоких энергий, так как радиационные нагрузки на больших ускорителях очень высоки, а детекторы могут содержать значительное количество

кристаллов. Кристалл BaF_2 представляет собой сцинтиллятор, обладающий собственной люминесценцией, состоящей из двух полос с максимумами на длинах волн 220 и 310 nm [1]. Основная доля энергии света сцинтилляции в кристалле BaF_2 приходится на длину волны излучения при распаде автолокализованных экситонов (АЛЭ) в области 320 nm, время высвечивания составляет 630 ns. Быстрая кросс-люминесценция происходит в области длин волн около 220 nm с временем высвечивания 0.6 ns. На подавление люминесценции АЛЭ в BaF_2 направлено достаточно много усилий ряда научных групп [2,3]. Подавление компоненты АЛЭ методом дополнительного легирования обладает следующими недостатками: дополнительное легирование, во-первых, снижает радиационную стойкость и, во-вторых, существенно снижает световыход кросс-люминесценции. Другие методы, например использование интерференционных светофильтров, пропускающих кросс-люминесценцию, но подавляющих люминесценцию АЛЭ, как это предложено в работе [4], также существенно подавляют световыход кросс-люминесценции. По этим причинам в настоящее время проблема остается нерешенной.

В настоящей работе мы предлагаем новое решение сформулированной проблемы. Полоса свечения кросс-люминесценции BaF_2 перекрывается с полосой поглощения и возбуждения люминесценции ионов Ce^{3+} в кристалле оксиортосиликата лютетия ($\text{Lu}_2\text{SiO}_5\text{:Y}^{3+}\text{:Ce}^{3+}\text{:Ca}^{2+}$) [5]. При этом полоса люминесценции АЛЭ BaF_2 не попадает в область, в которой возбуждение фотолуминесценции LYSO эффективно. Таким образом, если за кристаллом BaF_2 на оптический контакт установить тонкую (толщиной

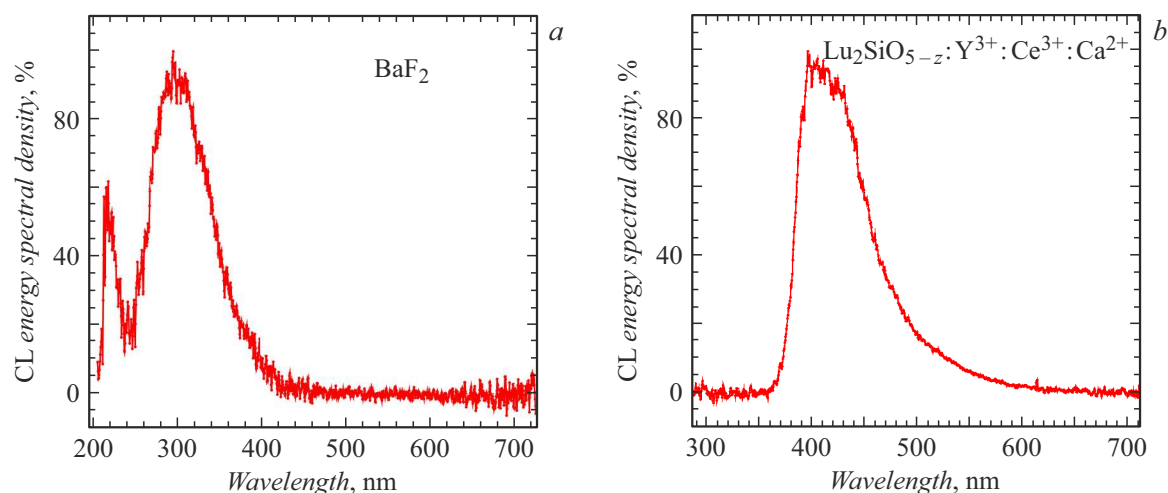


Рис. 1. Спектр ИКЛ модуля кристаллов BaF₂ (a) и LYSO (b).

порядка 1 mm) пластинку LYSO, она будет переизлучать преимущественно излучение кросс-люминесценции. Так как LYSO имеет достаточно малое время высвечивания (35–36 ns) [5], итоговое временное разрешение составного модуля BaF₂–LYSO равно 35–36 ns. При этом радиационная стойкость BaF₂ остается высокой, так же как и LYSO.

Технология выращивания кристаллов BaF₂ освоена в ряде мировых ростовых центров, в том числе и в России в Государственном оптическом институте им. С.И. Вавилова, и позволяет сравнительно недорого получать достаточно большие объемы кристаллов.

Технология выращивания кристаллов LYSO также освоена в России в Государственном научно-исследовательском и проектно-институте редкометаллической промышленности (Гиредмет). Высокоплотные и радиационно стойкие кристаллы LYSO востребованы в эмиссионно-позитронной томографии, а также в электромагнитной калориметрии высокого разрешения [5]. Однако стоимость кристаллов LYSO довольно высока, поэтому создание больших электромагнитных калориметров на их основе проблематично по экономическим соображениям. В то же время этой проблемы нет при использовании тонких пластин LYSO.

Для составного модуля электромагнитного калориметра использовались кристаллы BaF₂ размером 24.5 × 24.5 × 160 mm и пластина кристалла LYSO размером 23 × 23 × 1.5 mm. В данной системе пластина LYSO используется как переизлучатель коротких длин волн в область высвечивания с максимумом 440 nm, что соответствует максимуму спектральной чувствительности современных фотоприемников. Таким образом устраняется главный недостаток кристаллов BaF₂ — излучение в области коротких длин волн.

Для измерения эмиссионных спектров сцинтилляционных кристаллов BaF₂ и LYSO с хорошей статистикой был предложен подход, основанный на методе импульс-

ной катодолуминесценции (ИКЛ). Для исследования спектров ИКЛ использовалась система, состоящая из ускорителя электронов РАДАН-ЭКСПЕРТ, изготовленного в Институте электрофизики УрО РАН, и спектрометра фирмы Ocean Optics FLAME-S-XR1-ES с диапазоном 200–1024 nm [6]. Кривая спектральной чувствительности спектрометра была измерена при помощи эталонных дейтериевой и галогеновой ламп.

Измерение эмиссионных спектров имеет ключевое значение для создания эффективного составного модуля BaF₂–LYSO, так как очень важно получить соответствие эмиссионного спектра кристаллов и спектральной чувствительности ФЭУ.

Для измерения спектров ИКЛ образец кристалла облучался мощным (~ 10 MV) кратковременным (~ 2 ns) импульсом электронов со средней энергией в пучке ~ 150 keV с последующей регистрацией спектра возникающей в результате такого воздействия люминесценции.

На рис. 1, a представлен эмиссионный спектр кристаллов BaF₂, измеренный с помощью спектрометра Ocean Optics FLAME-S-XR1-ES. На спектре ИКЛ для кристалла BaF₂ видны два максимума излучения, соответствующие длинам волн 220 и 300 nm.

Спектры оптического пропускания и поглощения кристаллической пластины LYSO измерялись спектрофотометром Shimadzu UV-3101PC. На рис. 2 показана зависимость коэффициента поглощения LYSO от длины волны. Как видно, спектр поглощения LYSO имеет три максимума в области 250–350 nm, эти пики будут полностью поглощать сцинтилляционный свет 220–310 nm из BaF₂. При этом кристалл LYSO будет излучать сцинтилляционный свет синего цвета в области 400–500 nm (рис. 1, b).

Амплитудные распределения составного модуля BaF₂–LYSO при его облучении гамма-квантами от радиоактивного источника измерялись на специальной

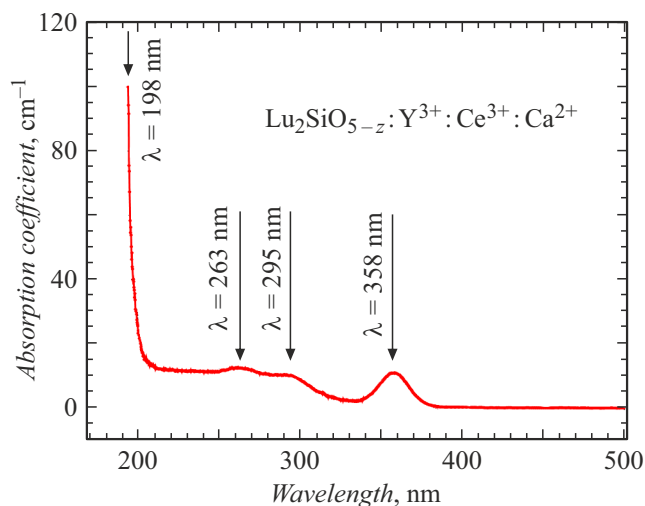


Рис. 2. Спектр поглощения кристаллов LYSO, измеренный на пластине толщиной 0.2 mm.

установке. Сцинтилляционный кристалл BaF₂ с помощью оптической смазки был соединен с пластиной LYSO. В свою очередь система BaF₂–LYSO соединялась с фотоумножителем ФЭУ-85 также с помощью оптической смазки.

Все остальные поверхности кристалла BaF₂ были завернуты в десять слоев тефлоновой ленты. Сцинтилляции в кристалле возбуждались радиоактивным источником ¹³⁷Cs. Фотоумножитель был подключен к стабилизированному источнику высоковольтного напряжения Canberra 3002D. Сигнал от фотоумножителя через предусилитель Canberra 2007B поступал на быстрый усилитель ORTEC-471 и далее через разветвитель на зарядочувствительный ADC (LeCroy 2249A). С другого выхода разветвителя сигнал поступал на дискриминатор ORTEC и далее на формирование строка для ADC. Длительность строка для зарядочувствительного ADC выбиралась в зависимости от длительности сигнала исследуемого сцинтиллятора.

На рис. 3, а приведен фотофикс от ¹³⁷Cs для составного модуля BaF₂–LYSO.

Для изучения однородности отклика была измерена зависимость световых выхода кристаллического составного модуля BaF₂–LYSO от расстояния между источником ¹³⁷Cs и фотоумножителем. Измерялись амплитудные распределения при облучении модуля от источника ¹³⁷Cs в шести точках, равномерно распределенных вдоль оси кристалла (рис. 4). Временные характеристики составного модуля BaF₂–LYSO исследованы следующим образом. Составной модуль присоединялся через оптический контакт к ФЭУ-85, фототок которого записывался осциллографом Tektronix MSO6-2500 BW с полосой пропускания 2.5 GHz. Сцинтилляции в модуле возбуждались радиоактивным гамма-источником ¹³⁷Cs. Усреднение 1000 зависимостей интенсивности сцинтилляции от времени представлено на рис. 3, b. Как можно видеть, кривая распада имеет время высвечивания 35 ns, соответствующее таковому для LYSO. Этот факт подтверждает работоспособность и эффективность предложенного метода подавления медленной компоненты люминесценции BaF₂.

Зависимость на рис. 3, a получена, когда гамма-кванты от источника ¹³⁷Cs двигались вдоль оси счетчика навстречу фотодетектору. Также проведены измерения, когда гамма-кванты распространялись перпендикулярно оси системы и попадали в дальний от фотодетектора край кристалла BaF₂. Картина, измеренная в этом случае, была точно такой же, как и на рис. 3, b. Видно, что имеется некоторое послесвечение после 200 ns, связанное с медленной компонентой люминесценции BaF₂, но его интенсивность в > 100 раз ниже, чем для быстрой компоненты, что демонстрирует высокую эффективность преобразования кросс-люминесценции BaF₂ в фотолюминесценцию LYSO.

Таким образом, в работе впервые предложен и исследован новый тип составного детектора на основе кристаллов BaF₂ и LYSO, позволяющий подавить медленную компоненту сцинтилляции BaF₂, сохраняя быструю ком-

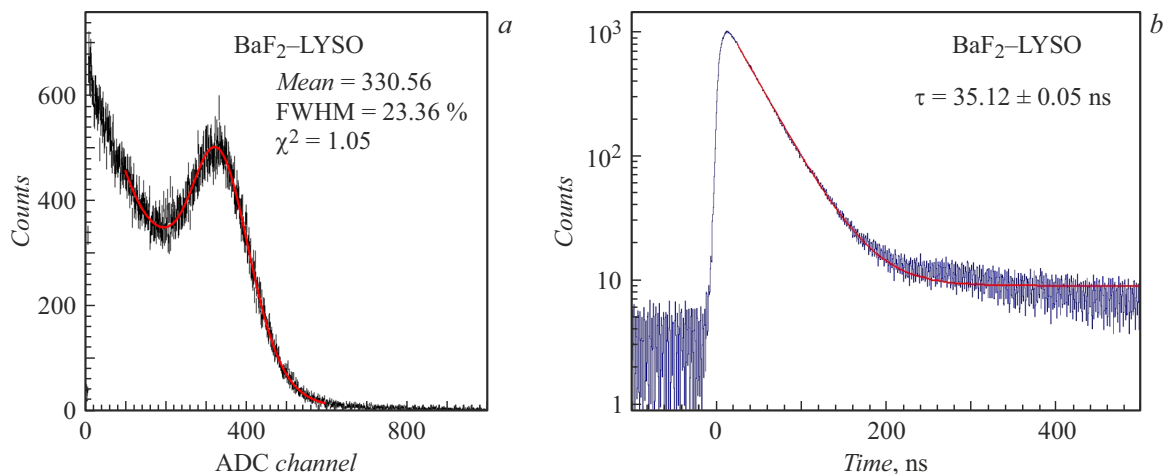


Рис. 3. Амплитудные (a) и временные (b) характеристики составного модуля BaF₂–LYSO, облученного гамма-квантами от источника ¹³⁷Cs.

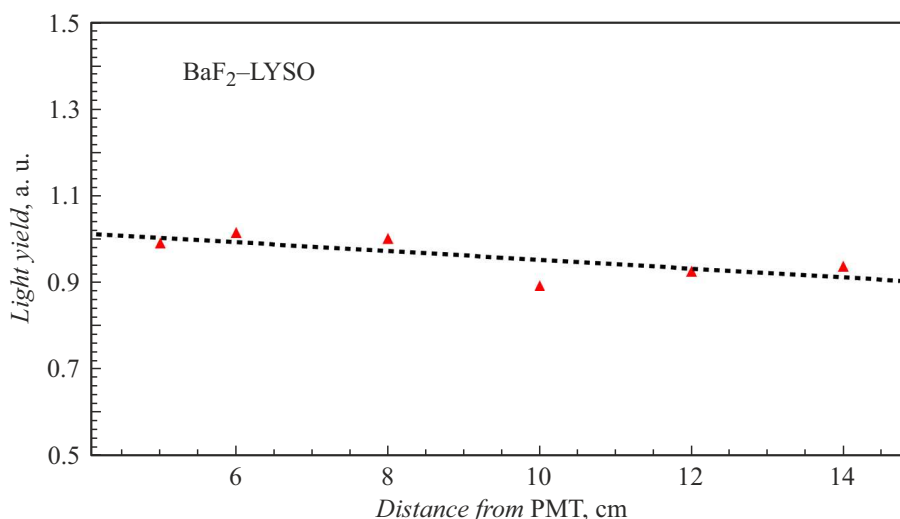


Рис. 4. Относительный световой выход кристаллического модуля $\text{BaF}_2\text{--LYSO}$ в зависимости от расстояния до ФЭУ.

поненту за счет преобразования кросс-люминесценции BaF_2 в фотолюминесценцию LYSO. Итоговое время высвечивания модуля составило 35 ns, контраст соотношения интенсивностей быстрой и медленной компонент сцинтилляции менее 100:1. При этом сохраняются основные преимущества BaF_2 : высокая радиационная стойкость и сравнительно невысокая цена производства.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] P.A. Rodnyi, *Radiat. Meas.*, **38** (4-6), 343 (2004). DOI: 10.1016/j.radmeas.2003.11.003
- [2] R. Shendrik, E. Radzhabov, A. Myasnikova, V. Pankratova, A. Šarakovskis, A. Nepomnyashchikh, A. Bogdanov, V. Gavrilenko, E. Kaneva, D. Sofich, T. Garmysheva, V. Pankratov, *Sci. Rep.*, **15** (1), 26558 (2025). DOI: 10.1038/s41598-025-11505-w
- [3] X. Li, C. Hu, L. Guo, J. Ye, Y. Zhang, J. Xu, J. Wu, Q. Liu, Y. Shi, J. Chen, T. Li, J. Li, *J. Am. Ceram. Soc.*, **108** (7), e20469 (2025). DOI: 10.1111/jace.20469
- [4] A.M. Artikov, V. Baranov, J.A. Budagov, A.N. Chivanov, Yu.I. Davydov, E.N. Eliseev, E.A. Garibin, V.V. Glagolev, A.V. Mihailov, P.A. Rodny, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1162** (1), 012028 (2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1162/1/012028
- [5] М.В. Белов, Ю.Д. Заварцев, М.В. Завертяев, А.И. Загуменный, В.А. Козлов, С.А. Кутовой, Н.В. Пестовский, С.Ю. Савинов, *Кр. сообщ. по физике ФИАН*, **49** (5), 3 (2022). [M.V. Belov, Yu.D. Zavartsev, M.V. Zavertyaev, A.I. Zagumennyi, V.A. Kozlov, S.A. Kutovoi, N.V. Pestovskii, S.Yu. Savinov, *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, **49** (5), 121 (2022). DOI: 10.3103/S1068335622050049].
- [6] V.I. Solomonov, S.G. Michailov, A.I. Lipchak, V.V. Osipov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin, M.R. Ulmaskulov, *Laser Phys.*, **16** (1), 126 (2006). DOI: 10.1134/S1054660X06010117