

СОПОСТАВЛЕНИЕ ВРЕМЕН ЗАТУХАНИЯ КАТОДО- И ГАММА-ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

А. И. Загуменный², А. Н. Лобанов¹, А. В. Михайлов³, В. Н. Очкин^{1,4},
Н. В. Пестовский^{1,4}, А. А. Петров^{1,4}, С. Ю. Савинов^{1,4}

Проведено сопоставление времен затухания импульсной катодолюминесценции (ИКЛ) кристаллов Lu_2SiO_5 (LSO) и $Lu_{1.8}Y_{0.2}SiO_5$ (LYSO) с временами затухания люминесценции аналогичных кристаллов, возникающей под воздействием гамма-излучения. Установлено, что времена затухания ИКЛ и гамма-люминесценции для соответствующих кристаллов в пределах ошибки измерений совпадают.

Ключевые слова: катодолюминесценция, гамма-люминесценция, сцинтилляционные кристаллы.

Сцинтилляционные кристаллы для детектирования гамма-излучения имеют широкий спектр практических приложений. Одно из наиболее важных и массовых связано с использованием подобных кристаллов в качестве составной части детекторов в позитронно-эмиссионных томографах.

В настоящее время тестирование сцинтилляционных кристаллов производится методом гамма-люминесценции (ГЛ) с применением радиоактивных источников. Это порождает определенные проблемы, связанные как с использованием и хранением радиоактивных препаратов, так и с необходимостью регистрации оптического излучения малой интенсивности. В частности, для измерения времен затухания люминесценции приходится применять методику счета одиночных фотонов (см., напр., [1]).

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53.

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

³ Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ), 199034 Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7-9.

⁴ Московский физико-технический институт (Государственный университет) (МФТИ), 141707 Россия, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9; e-mail: pestovsky@phystech.edu.

Нами предлагается подход, основанный на методе импульсной катодолюминесценции (ИКЛ) [2, 3]. Образец облучается мощным (~ 10 МВт) и кратковременным (~ 2 нс) импульсом электронов со средней энергией в пучке ~ 150 кэВ с последующей регистрацией интенсивности, возникающей в результате такого воздействия люминесценции в зависимости от времени.

В работе [4] было показано, что для набора кристаллов-сцинтилляторов спектры ИКЛ и ГЛ под действием радиоактивного источника излучения с энергией частиц 511 кэВ совпадают, что позволяет использовать метод ИКЛ для измерения спектра ГЛ кристаллов. При этом, благодаря высокой мощности электронного пучка, интенсивность ИКЛ примерно на пять порядков превышает интенсивность ГЛ.

Для проверки возможности применения метода ИКЛ для измерения времен затухания ГЛ сцинтилляционных кристаллов нами было проведено измерение времен затухания ИКЛ для кристаллов Lu_2SiO_5 и $\text{Lu}_{1.8}\text{Y}_{0.2}\text{SiO}_5$ и проведено сравнение полученных результатов с литературными данными по времени затухания люминесценции под воздействием гамма-излучения для кристаллов того же типа, опубликованных в работах [1, 5–7].

В работе [4] исследования спектров ИКЛ проводилось на установке на базе спектрометра КЛАВИ [2, 3]. Для исследования кинетики ИКЛ установка была доработана по схеме, представленной на рис. 1. Из блока возбуждения люминесценции выведен дополнительный оптоволоконный жгут, по которому излучение проходит в призмный монохроматор ДМР-4 со спектральным разрешением ~ 1 нм и областью дисперсии 200–1000 нм. Использовался фотоэлектрический умножитель ФЭУ-62 (временное разрешение ~ 15 нс, область спектральной чувствительности 400–1200 нм). Сигнал с ФЭУ передавался на цифровой осциллограф Tektronix TDS-210B с полосой пропускания 300 МГц. Таким образом, общее временное разрешение установки составляло ~ 15 нс. Относительная ошибка при измерении длительности высвечивания кристалла составляла $\sim 10\%$. Установка позволяет исследовать кинетику ИКЛ на различных длинах волн от видимого диапазона до ближнего ультрафиолета. В описываемых экспериментах входная и выходная щели монохроматора были открыты на предельно большую ширину так, что диапазон детектируемого сигнала соответствовал примерно 400–1000 нм.

Были получены кривые затухания ИКЛ для кристаллов Lu_2SiO_5 (LSO) и $\text{Lu}_{1.8}\text{Y}_{0.2}\text{SiO}_5$ (LYSO), что позволило оценить времена затухания люминесценции и сопоставить полученные данные с временами затухания гамма-люминесценции этих кристаллов [1, 5–7].

Т а б л и ц а 1

Времена затухания ИКЛ и гамма-люминесценции

Кристалл	Результаты эксперимента по ИКЛ		Литературные данные по гамма-люминесценции	
	Особенности измеряемого образца: активирующий ион, его концентрация, n	Время затухания, нс	Источник данных и радиоактивный образец, другие условия эксперимента*	Время затухания, нс
Lu ₂ SiO ₅ (LSO)	Ce ³⁺ , $n = 0.15\%$	45 ± 7	[4] ¹³⁷ Cs	~40
	Ce ³⁺ , $n = 0.35\%$, Se ³⁺ , $n = 6\%$	45 ± 7	[5] ¹³⁷ Cs, ⁶⁰ Co, α-частицы [6] ¹³⁷ Cs, ⁵⁷ Co, ⁵¹ Cr, и др.	46–47 40–45
Lu _{2-x} Y _x SiO ₅ (LYSO)	Cs ³⁺ , $n = 0.075\%$ $X = 0.2$	45 ± 7	[7] ¹³⁷ Cs, $X = 1.4$	50.1

* все результаты, взятые из литературных источников, соответствуют образцам, допированным ионом Ce³⁺.

В таблице 1 приведены времена затухания ИКЛ и ГЛ кристаллов. Для образцов типа LSO и LYSO времена затухания ИКЛ равны в пределах ошибки измерений и составляют 45 ± 7 нс. Для кристаллов LSO времена затухания ГЛ многократно измерялись (см. напр., [5–7]). В работе [5] исследовалась люминесценция образца под воздействием источника ¹³⁷Cs, испускающего гамма-кванты с энергией 0.662 МэВ. Концентрация Ce³⁺ составляла 0.12% и 0.25%. Была получена длительность ~40 нс. В работе [6] измерялась длительность затухания ГЛ под действием источников ¹³⁷Cs и ⁶⁰Co. Время затухания люминесценции составило ~47 нс. В работе [7] измерена длительность затухания люминесценции при возбуждении гамма-излучением различной энергии: ¹³⁷Cs (0.662 МэВ и 0.032 МэВ), ⁵¹Cr (0.32 МэВ), ⁵⁷Co (0.122 МэВ) и других, испускающих частицы меньшей энергии. Было получено, что в диапазоне энергий возбуждения 0.02–0.662 МэВ длительность затухания люминесценции ~45 нс. Таким образом, время затухания ИКЛ кристалла LSO совпадает со временем затухания гамма-люминесценции. Время зату-

хания ГЛ кристаллов LYSO под воздействием источника ^{137}Cs исследовалось в [1]. Была получена длительность 50.1 нс.

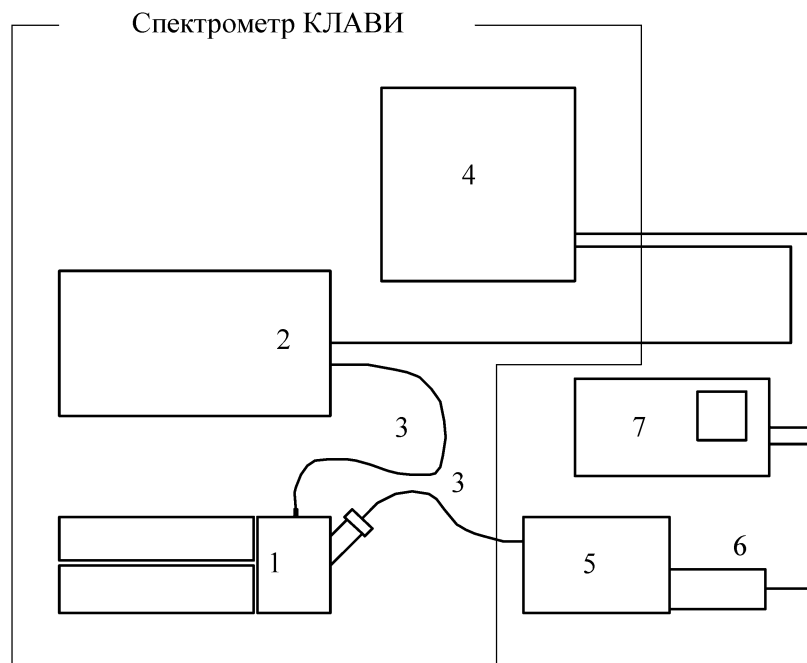


Рис. 1: Блок-схема установки для измерения кинетики затухания ИКЛ. 1 – блок возбуждения ИКЛ, 2 – многоканальный фотоприемник, 3 – оптоволоконный жгут, 4 – персональный компьютер, 5 – монохроматор, 6 – фотоумножитель, 7 – цифровой осциллограф.

Из результатов сравнения видно, что времена, измеренные при помощи метода ИКЛ, в пределах ошибки измерений равны временам, измеренным методом гамма-люминесценции для кристаллов типа LSO и LYSO.

Совпадение времен высвечивания для кристаллов LSO и LYSO для ИКЛ и гамма-люминесценции объяснимо. Если энергия гамма-квантов не превышает 1 МэВ (во всех цитируемых работах исследовалась ГЛ под воздействием излучения с энергией меньше либо равной 660 кэВ), то они теряют энергию в веществе либо в процессе фотоэффекта, либо в процессе комптоновского рассеяния. В случае фотоэффекта в результате поглощения фотона рождается быстрый электрон, выбитый преимущественно из внутренних электронных оболочек [8], и вакансия в атоме, на которую переходят электроны с вышележащих электронных оболочек с испусканием характеристического рентгеновского излучения. В случае эффекта Комптона энергия гамма-кванта делится между элек-

троном и рассеянным фотоном, с энергией, соответствующей рентгеновской области спектра. Таким образом, в начальный момент в образце имеются быстрые электроны с энергией порядка сотен кэВ и рентгеновское излучение.

При инъекции электронного пучка со средней энергией порядка 150 кэВ в кристалл происходит ударная ионизация атомов среды и испускается тормозное излучение [2, 9, 10]. Вклад тормозного излучения мал – не более 10% от ионизационных потерь [10], а ударная ионизация в случае быстрого электрона происходит по сценарию, близкому к описанному выше для ГЛ, с выбиванием атомных электронов из внутренних электронных оболочек и испусканием характеристических квантов. Таким образом, несмотря на разницу в первичных процессах (в которых участвует исходная частица), вторичные процессы в обоих случаях характеризуются ионизацией и возбуждением среды вторичными электронами и поглощением в объеме образца рентгеновских квантов. Возбуждение энергетических уровней среды, распад которых приводит к видимой люминесценции, происходит в подавляющем количестве случаев с участием электронов с энергией порядка ширины запрещенной зоны [2], следовательно, вне зависимости от способа возбуждения (электронами или гамма-квантами), длительность высвечивания люминесценции одинакова и определяется только свойствами кристалла. Разница может быть вызвана только эффектами, вызванными различием глубины проникновения электронов и гамма-излучения в вещество.

Измерены времена затухания ИКЛ кристаллов Lu_2SiO_5 (LSO) и $\text{Lu}_{1.8}\text{Y}_{0.2}\text{SiO}_5$ (LYSO). Их величины составляют 45 ± 7 нс. Проведено сравнение полученных результатов с литературными данными по временам затухания гамма-люминесценции. Установлено, что в пределах ошибки измерений времена затухания для соответствующих кристаллов равны. Данный результат, совместно с выводами работы [4] о совпадении спектров ИКЛ и ГЛ, обосновывает применимость метода ИКЛ для измерения характеристик и контроля качества сцинтилляционных кристаллов. Метод ИКЛ при этом обладает существенными преимуществами: примерно на пять порядков большей интенсивностью и отсутствием проблем с хранением и использованием радиоактивных препаратов.

Работа выполнена за счет средств Российского научного фонда (проект № 14-02-00784).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] P. Szupryczynski et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. **51**(3), 1103 (2004).

- [2] В. И. Соломонов, С. Г. Михайлов, *Импульсная катодоллюминесценция и её применение для анализа конденсированных веществ* (Екатеринбург, Типография УРО РАН, 2003).
- [3] V. I. Solomonov, S. G. Michailov, A. I. Lipchak, et al., *Laser Physics* **16**(1), 126 (2006).
- [4] М. В. Завертяев, А. И. Загуменный, В. А. Козлов и др., *Письма в ЖТФ* **40**(10), 73 (2014).
- [5] C. L. Melcher and J. S. Schweitzer, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **39**(4), 502 (1992).
- [6] T. Ludziejewski, K. Moszynska, M. Moszynski, et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **42**(4), 328 (1994).
- [7] Lukas Swiderski, Marek Moszynski, Agnieszka Syntfeld-Kazuch, et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **749**, 68 (2014).
- [8] F. R. McFeely, et al., *Phys. Rev. B* **9**(12), 5268 (1974).
- [9] Д. И. Вайсбурд и др., *Высокоэнергетическая электроника твёрдого тела* (Новосибирск, Наука, Сибирское отделение, 1982).
- [10] К. Клайнкнехт, *Детекторы корпускулярных излучений* (М., Мир, 1990).

Поступила в редакцию 26 ноября 2014 г.