

06:09

## Сопоставление спектров катодо- и гамма-люминесценции сцинтилляционных кристаллов

© М.В. Завертяев, А.И. Загуменный, В.А. Козлов, В.Н. Очкин,  
Н.В. Пестовский, А.А. Петров, С.Ю. Савинов

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), Москва  
Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН (ИОФАН), Москва  
Московский физико-технический институт (Государственный университет)  
(МФТИ), Московская обл., Долгопрудный  
E-mail: samosval@mail15.com

Поступило в Редакцию 21 января 2014 г.

Исследованы спектры импульсной катодолуминесценции (ИКЛ) кристаллов CsI : Tl, YAG : Ge<sup>3+</sup>, Tb<sup>3+</sup> и LFS-3, вызванной мощным (порядка 10 MW) и кратковременным (длительностью порядка 2 ns) воздействием электронного пучка со средней энергией частиц  $\sim 150$  keV, и спектры стационарной люминесценции этого же набора кристаллов под воздействием гамма-квантов с энергий 511 keV, испускаемых радиоактивным образцом <sup>22</sup>Na. Установлено, что полученные спектры идентичны друг другу. Этот результат позволяет применять метод ИКЛ для экспресс-анализа кристаллов-сцинтилляторов.

Сцинтилляционные кристаллы для детектирования гамма-излучения имеют широкий спектр практических приложений. Одно из наиболее важных связано с использованием подобных кристаллов в качестве составной части детекторов, предназначенных для использования в позитронно-эмиссионных томографах. Позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) — это современный способ ранней диагностики онкологических, кардиологических и неврологических заболеваний. В отличие от компьютерной и магниторезонансной томографии, оценивающих лишь структурные изменения органов, ПЭТ позволяет получить трехмерную реконструкцию функциональных процессов, происходящих в организме.

В настоящее время тестирование сцинтилляционных кристаллов производится методом гамма-люминесценции с применением радиоак-

тивных источников. Это порождает определенные проблемы, связанные как с использованием и хранением радиоактивных препаратов, так и с необходимостью регистрации оптического излучения малой интенсивности.

Нами предлагается подход, основанный на методе импульсной катодолюминесценции (ИКЛ) [1,2]. Образец облучается мощным ( $\sim 10$  MW) и кратковременным ( $\sim 2$  ns) импульсом электронов со средней энергией в пучке  $\sim 150$  keV с последующей регистрацией спектра, возникающей в результате такого воздействия люминесценции.

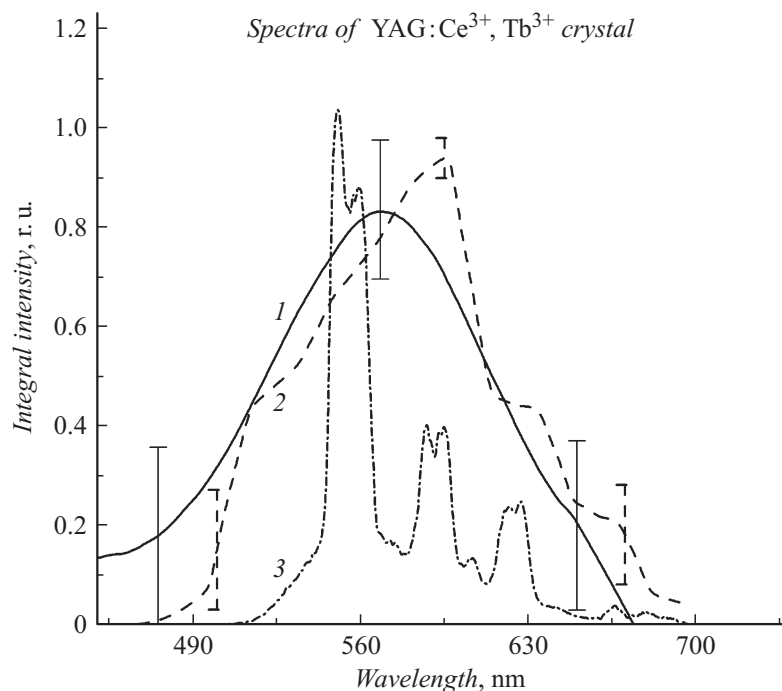
Для проверки возможности применения метода ИКЛ для анализа сцинтилляционных свойств кристаллов было проведено сравнение спектров катодо- и гамма-люминесценций. Исследовались спектры кристаллов: LFS-3 [3], CsI : Tl, YAG : Tb<sup>+</sup>, Ce<sup>3+</sup>.

Измерение спектров катодолюминесценции проводилось на установке КЛАВИ [1,2], построенной из автономных блоков: блока возбуждения люминесценции, спектрографа с многоканальным фотоприемником и компьютера.

Блок возбуждения люминесценции представляет собой сочленение импульсного ускорителя электронов РАДАН-ЭКСПЕРТ с аналитической камерой, которая также выполняет функции экранировки внешнего оптического излучения, защиты от электромагнитных помех и биологической защиты от воздействия электронного пучка и рентгеновского излучения.

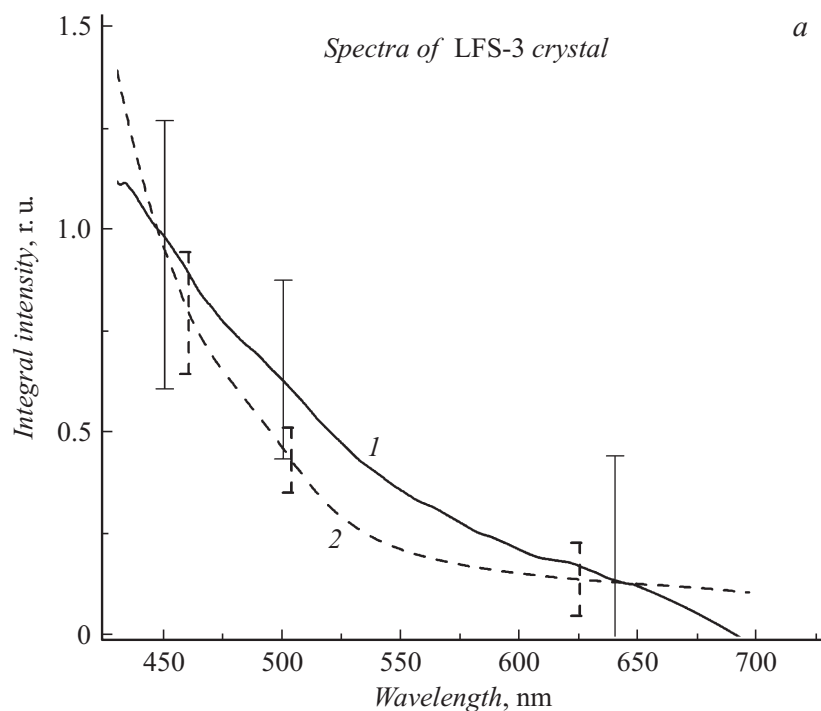
Световой поток люминесцирующего образца из аналитической камеры передается многожильным кварцевым световодом на вход спектрографа ОС-12С, снабженного фотодетекторной головкой МОРС-1/ЭОП/В/2048, представляющей собой волоконно-оптическое сочленение электронно-оптического преобразователя (ЭОП) с линейным прибором с зарядовой связью (ПЗС-линейка) типа LX511. Адаптер фотоприемника установлен в PCI-слоте компьютера.

Спектральная область регистрации — 400–700 nm, аппаратная функция и спектральное разрешение — не хуже 2 nm, динамический диапазон чувствительности — 7 порядков, из которых три обеспечиваются ПЗС-линейкой и четыре — дискретным регулированием напряжения на микроканальной пластине (МКП) ЭОП. Кривая спектральной чувствительности спектрометра получена из измерения спектра Солнца с последующим сравнением с табличным спектром [4], снятым у поверхности Земли.



**Рис. 1.** Спектр гамма-люминесценции кристалла  $\text{YAG}:\text{Ce}^{3+}, \text{Tb}^{3+}$  (1); ИКЛ-спектр кристалла  $\text{YAG}:\text{Ce}^{3+}, \text{Tb}^{3+}$ , снятый с разрешением 2 nm (2); ИКЛ-спектр низкого разрешения кристалла  $\text{YAG}:\text{Ce}^{3+}, \text{Tb}^{3+}$  (3).

Для возбуждения гамма-люминесценции применялся источник с радиоактивным изотопом  $^{22}\text{Na}$  активностью 900 kBq. Данный изотоп имеет два канала распада. В 90% случаев испускается позитрон и в 10% — гамма-квант с энергией примерно 1.3 MeV. В случае испускания позитрона он немедленно аннигилирует с электроном в объеме самого источника, испуская два гамма-кванта с энергией 511 keV, распространяющиеся в противоположных направлениях. Изотоп  $^{22}\text{Na}$  был выбран как источник гамма-излучения с энергией 511 keV, чтобы повторить условия применения кристалла в качестве детектора соответствующего излучения в ПЭТ-томографах. Регистрация спектра гамма-люминесценции осуществлялась посредством спектрографа установки



**Рис. 2.** Спектр гамма-люминесценции кристалла (1); ИКЛ-спектр низкого разрешения кристаллов (2) LFS-3 (a) и CsI-Tl (b).

**КЛАВИ.** Так как люминесценция кристаллов под действием излучения данного радиоактивного образца характеризуется малой интенсивностью, входная щель спектрографа была открыта на предельно возможную ширину 5 mm (что привело к ухудшению спектрального разрешения до 40 nm) и производилось осреднение 300–400 измерений спектра.

Для корректного сравнения ИКЛ-спектра, снятого с разрешением 2 nm, и спектра гамма-люминесценции, снятого с разрешением 40 nm, была произведена операция свертки ИКЛ-спектров с прямоугольной функцией шириной 40 nm.

На рис. 1 представлены спектры кристалла YAG : Ce<sup>3+</sup>, Tb<sup>3+</sup>.

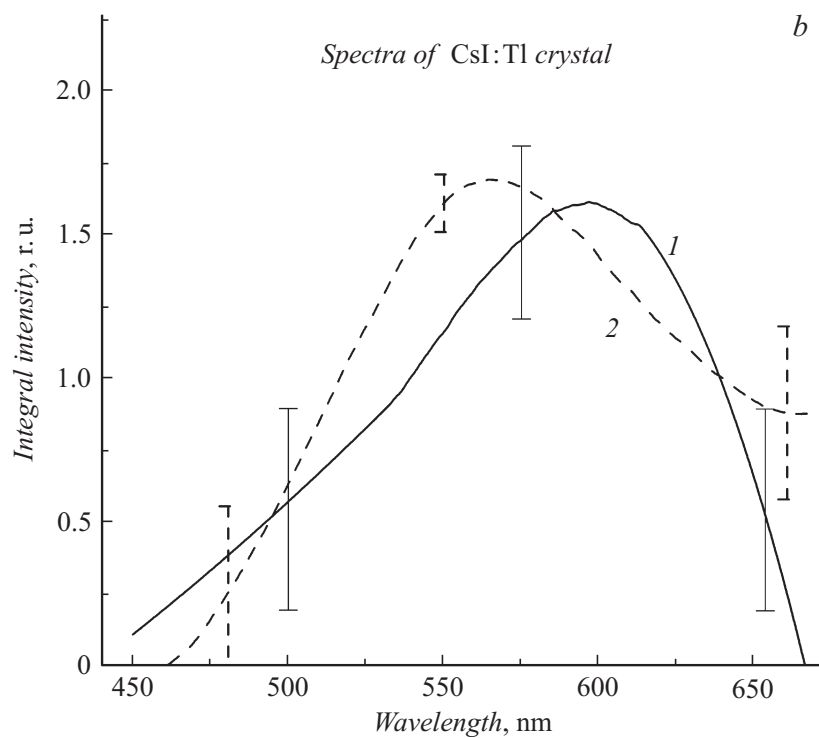


Рис. 2 (продолжение).

На рис. 2 изображены спектры кристаллов LFS-3 и CsI:Tl. Видно, что в пределах ошибки измерений спектры совпадают. При этом интенсивность ИКЛ-излучения на порядки превышает интенсивность излучения гамма-люминесценции.

Объяснение факта тождественности спектров лежит в механизме возбуждения люминесценции кристаллов в видимой области под высокоэнергетическим воздействием: гамма-кванты с энергией 511 keV теряют энергию либо в процессе фотоэффекта, либо в процессе комптоновского рассеяния. В случае фотоэффекта в результате поглощения фотона рождаются быстрый электрон, выбитый преимущественно из внутренних электронных оболочек [5], и вакансия в атоме, на ко-

торую переходят электроны с вышележащих электронных оболочек с испусканием характеристических рентгеновских квантов. В случае эффекта Комптона энергия гамма-кванта делится между электроном и рассеянным квантом с энергией, соответствующей рентгеновской области спектра. Таким образом, в начальный момент в образце имеются быстрые электроны с энергией порядка сотен keV и рентгеновское излучение.

При инжекции электронного пучка со средней энергией порядка 150 keV в кристалл происходит ударная ионизация атомов среды и испускается тормозное излучение [1,6,7]. Вклад тормозного излучения мал — не более 10% от ионизационных потерь [7]. Ударная ионизация в случае быстрого электрона происходит по близкому сценарию 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. К люминесценции приводят процессы с участием электронов с энергией порядка ширины запрещенной зоны [1], следовательно, нет оснований ожидать разницы в спектрах люминесценции, за исключением эффектов глубины проникновения.

Результаты работы обосновывают применимость метода ИКЛ для экспресс-анализа кристаллов-сцинтилляторов, ориентированных на детектирование излучения энергией 511 keV, в частности, для нужд ПЭТ-томографии.

Работа осуществлена при поддержке гранта РФФИ № 13-08-01188.

## Список литературы

- [1] Соломонов В.И., Михайлов С.Г. Импульсная катодолюминесценция и ее применение для анализа конденсированных веществ. Екатеринбург: Типография УРО РАН, 2003. 182 с.
- [2] Solomonov V.I., Michailov S.G., Lipchak A.I., Osipov V.V., Shpak V.G., Shunailov S.A., Yalandin M.I., Ulmaskulov M.R. // Laser Physics. 2006. V. 6. N 1. P. 126–129.
- [3] Заварцев Ю.Д., Завертяев М.В., Загуменный А.И., Зерроук А.Ф., Козлов В.А., Кутовой С.А. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2013. Т. 40 (2). С. 13–20.

- [4] <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/>
- [5] *McFeely F.R.* et al. // *Phys. Rev. B.* 1974. V. 9. N 12. P. 5268.
- [6] *Вайсбурд Д.И.* и др. *Высокоэнергетическая электроника твердого тела.* Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1982. 272 с.
- [7] *Клайнкнехт К.* *Детекторы корпускулярных излучений.* М.: Мир, 1990. 224 с.