
ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 539.1.074.3, 621.386.82

СЦИНТИЛЛЯТОРЫ ДЛЯ ДВУМЕРНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ДЕТЕКТОРОВ ИЗ МОНОКРИСТАЛЛОВ ИТРИЙ-АЛЮМИНИЕВЫХ ГРАНАТОВ, АКТИВИРОВАННЫХ ЦЕРИЕМ И ТЕРБИЕМ

©2024 г. В. Е. Асадчиков^а, В. А. Федоров^а, А. Ю. Григорьев^а, А. В. Бузмаков^а, Б. С. Рошин^а,
И. Г. Дьячкова^{а,*}, А. А. Русаков^а, И. Д. Веневцев^б, Е. С. Салтанова^а, С. В. Кузин^{а,с},
А. И. Родионов^д

^аИнститут кристаллографии им. А.В. Шубникова
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”
Россия, 119333, Москва, Ленинский просп., 59

^бСанкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, литера Б

^сИнститут космических исследований Российской академии наук
Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

^дАО “НТЦ “Реагент” Россия, 119331, Москва, просп. Вернадского, 29

*e-mail: sig74@mail.ru

Поступила в редакцию 17.10.2024 г.

После доработки 19.11.2024 г.

Принята к публикации 20.11.2024 г.

Описаны особенности получения оптимизированных для использования в качестве рентгеновских сцинтилляторов монокристаллов итрий-алюминиевых гранатов, легированных церием и тербием. Рассмотрены их рентгенолюминесцентные свойства. Представлены результаты применения одного из этих сцинтилляторов в конструкции двумерного рентгеновского детектора.

DOI: 10.31857/S0032816224060113 EDN: EKXYID

1. ВВЕДЕНИЕ

Детекторы рентгеновского излучения являются ключевой частью экспериментальных и технических установок с применением рентгеновского излучения. Такие установки применяются в медицинской диагностике, промышленной дефектоскопии, анализе материалов в науке и технике, космических исследованиях и др. [1–3]. В этих областях все чаще возникает задача отслеживания динамических процессов, что добавляет к детекторам рентгеновского излучения требования к разрешению по времени, которое должно удовлетворять условиям фиксирования и изучения таких событий.

С конца прошлого века на смену ранее применявшимся двумерным детекторам стали приходить твердотельные двухкоординатные детекторы — кремниевые ПЗС- и КМОП-матрицы. Принцип их действия заключается в регистрации электромагнитного излучения в чувствительной области отдельных ячеек, где под его воздействием происходит генерация электронов, которые затем преобразуются в цифровой сигнал. Таким образом, это принципиально увеличивает скорость регистрации изображений (в современных матрицах она может достигать десятков кГц) и позволяет проводить их обработку в онлайн-режиме. Несмотря на то, что матрицы разрабатывались в первую очередь для

регистрации видимого и ближнего ИК-диапазона излучения (0.4–1.0 мкм), они, однако, способны регистрировать и рентгеновское излучение. При этом разрешение, которое получается в процессе такой регистрации, ограничено размером отдельной ячейки матрицы, а размер регистрируемой области — размером ее чувствительной области. Одним из принципиальных ограничений матриц для прямой регистрации рентгеновских изображений является низкая эффективность регистрации. Поскольку толщина чувствительного слоя в кремниевых матрицах составляет несколько микрометров, эффективность регистрации рентгеновского излучения с энергией несколько килоэлектронвольт составляет доли процента. Другое существенное ограничение состоит в повреждении структуры электродов и материала чувствительного слоя матрицы под действием рентгеновского излучения, что приводит к ее деградации. Как правило, радиационная стойкость кремниевых ПЗС-матриц составляет десятки грей, а для КМОП-матриц — на порядок больше.

Влияние этих ограничений можно скомпенсировать путем использования матричных детекторов с конвертацией рентгеновского излучения, т.е. рентгеновское излучение не фиксируется напрямую, а переводится сначала в видимый спектр и затем детектируется матрицей. Есть несколько типов конверторов рентгеновского излучения в электроны, которые непосредственно регистрируются матрицей, или в излучения видимого диапазона. Наиболее распространенными из них являются сцинтилляторы. Сцинтиллятор для матричного кремниевого детектора представляет собой экран из порошкового люминофора на прозрачной подложке или кристалла-сцинтиллятора, оптическое изображение с которого переносится на матрицу проекционным объективом. Преимуществом такого приемника является возможность варьировать размер области регистрации и разрешение внутри нее в широких пределах. Эти характеристики определяются оптическими свойствами сцинтиллятора и проекционного объектива. Кроме того, при использовании сцинтиллятора имеется возможность его изготовления с формой, отличной от плоскости, что помогает оптимизировать экспериментальную установку. Необходимо особо отметить высокую радиационную стойкость такого типа детекторов, которая достигает тысяч грей. Это позволяет использовать их с мощными источниками рентгеновского излучения, такими как

синхротроны, а также в длительных космических экспериментах. При разработке таких детекторов возникают определенные требования к сцинтилляторам. Для обеспечения требуемого пространственного разрешения они должны иметь толщину, согласованную с требуемым разрешением, увеличением и апертурой проекционного объектива, а также спектр люминесценции, близкий к максимуму спектральной чувствительности кремниевых матриц (0.6–0.7 мкм).

В настоящей работе были проанализированы рентгенофлуоресцентные свойства ряда сцинтилляционных кристаллов в рабочем диапазоне энергий рентгеновского излучения. Проведен выбор и дополнительные исследования наиболее эффективных из них. Разработана методика получения таких кристаллов, и, наконец, был использован один из них в конструкции созданного двумерного детектора.

2. СПЕКТРЫ РЕНТГЕНОВСКОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ НЕКОТОРЫХ КРИСТАЛЛОВ

С учетом актуальности применения, на что указывалось выше, свойства сцинтилляторов изучаются многими авторами в течение уже значительного времени. Например, в работе [4] приведены характеристики некоторых из них (табл. 1). Однако авторы не обсуждают вопросы качества структуры изучаемых ими материалов и их характеристики в идентичных условиях. При этом сами сцинтилляционные материалы были получены различными методами.

По этой причине нами была создана собственная установка для исследования спектров высвечивания кристаллов сцинтилляторов при их облучении рентгеновским излучением в условиях, приближенных к реальному применению (рис. 1).

В качестве источника излучения использована рентгеновская трубка с вольфрамовым анодом. Часть кожуха рентгеновской трубки размещена в рентгенозащитной камере таким образом, что окно выхода рентгеновского излучения было направлено вниз и облучение образца на столике осуществляется максимально широким пучком. Доступ в камеру для установки и юстировки образца осуществляется через дверцу, изготовленную из защитного свинцового стекла и оснащенную концевым выключателем, предотвращающим возможность включения источника излучения при открытой дверце.

Таблица 1. Параметры распространенных сцинтилляторов [4]

Сцинтиллятор	Плотность, г/см ³	Световойход, фотонов/МэВ	Время высвечивания без учета послесвечения, нс	Максимум излучения, нм	Глубина экспоненциальной экстинкции излучения энергией 17.5 кэВ, мкм
BaF ₂	4.88	1500	0.6–0.8	180–220	62
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂	7.1	8600	300	480	15
CdWO ₄	7.9	20000	5000	495	23
CsI	4.51	2000	16	315	58
CsI:Na	4.51	40000	630	420	32
CsI:Tl	4.51	66000	800	550	63
Gd ₂ SiO ₅ :Ce	6.7	8000	60	420	30
K ₂ LaI ₅ :Ce	4.4	55000	24	420	86
LaBr ₃ :Ce	5.3	61000	35	358	20
LaCl ₃ :Ce	3.86	46000	25	330	29
LuAlO ₃ :Ce	8.34	12000	18	365	21
Lu ₃ Al ₅ O ₁₂ :Ce	6.67	12500	55	530	87
Lu ₂ SiO ₅ :Ce	7.4	26000	30	390	13
NaI:Tl	3.67	41000	230	410	33
PbWO ₄	8.28	300	2–3	410	49
YAlO ₃ :Ce	5.6	21000	20–30	360	37
Y ₃ Al ₅ O ₁₂ :Ce	4.56	24000	90–120	550	41
Y ₂ SiO ₅ :Ce	4.45	9200	42	420	62
ZnO	5.61	3200	10	520	15

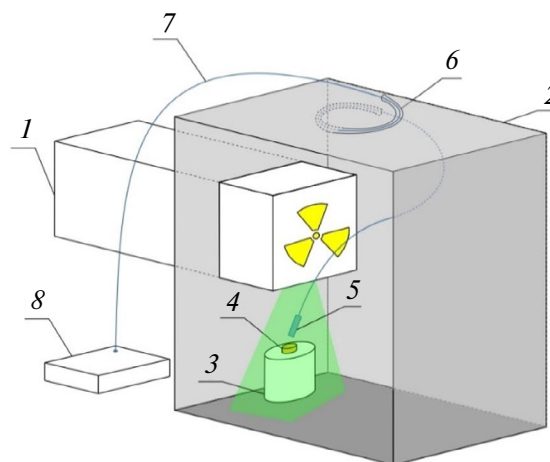
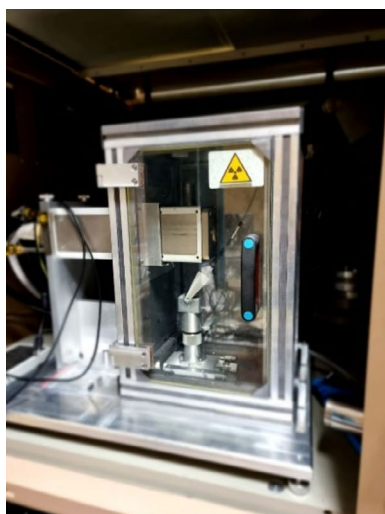


Рис. 1. Рентгеновский спектрометр (слева) и его схема (справа): 1 – рентгеновская трубка, 2 – рентгенозащитная камера, 3 – столик для образца, 4 – образец, 5 – конденсор, 6 – свинцовые каналы, 7 – световод, 8 – анализатор спектров.

Столик образца имеет регулировки по горизонтали и вертикали для выбора оптимального положения исследуемых кристаллов различной толщины. Конденсор, расположенный на конце световода оптического спектрометра, закреплен на столике с помощью кронштейна с градуировкой, позволяющей установить угол регистрации оптического излучения относительно поверхности исследуемого кристалла. Сам световод выведен из рентгенозащитной камеры через два полукруглых свинцовых канала, образующих лабиринт, что исключает попадание рентгеновского излучения наружу.

Было исследовано значительное количество сцинтилляторных кристаллов. Полученные спектры рентгенофлуоресценции некоторых из них представлены на рис. 2.

При выборе предпочтительного для дальнейшего применения сцинтиллятора мы также опирались на спектр чувствительности матрицы детектора. Наибольшая чувствительность зеленого канала CMOS-матрицы наблюдается на длине волны около 550 нм, что очень близко к максимумам спектра излучения монокристаллов иттрий-алюминиевых гранатов, легированных церием и тербием — YAG:(Ce,Tb) [5]. Оптимальным был бы сцинтиллятор, излучающий в максимуме на длине волны около 650 нм, чтобы попасть в максимум чувствительности

кремниевых матриц. Однако материалов, излучающих на такой длине волны и обладающих другими подходящими характеристиками, нам обнаружить не удалось.

Таким образом, это только добавляет уверенности в правильности выбора YAG:(Ce,Tb) в качестве материала-сцинтиллятора для реализации детектора с высоким пространственным разрешением, а потому определяет важность получения достаточно крупных и соответствующим образом легированных монокристаллов иттрий-алюминиевого граната оптического качества.

3. ВЫРАЩИВАНИЕ СЦИНТИЛЛЯТОРНЫХ КРИСТАЛЛОВ

Монокристаллы YAG:Ce и другие изоструктурные кристаллы гранатов для сцинтилляционных применений изготавливаются с использованием различных методов кристаллизации из высокотемпературных расплавов [6–8]. Наиболее распространенным является метод Чохральского, который позволяет получать достаточно крупные кристаллы с диаметром до 100 мм с концентрацией Ce до 0.3 ат.% замещения иттрия в структуре кристаллов граната (из которых можно изготавливать элементы с рабочей апертурой до 50 мм). Согласно

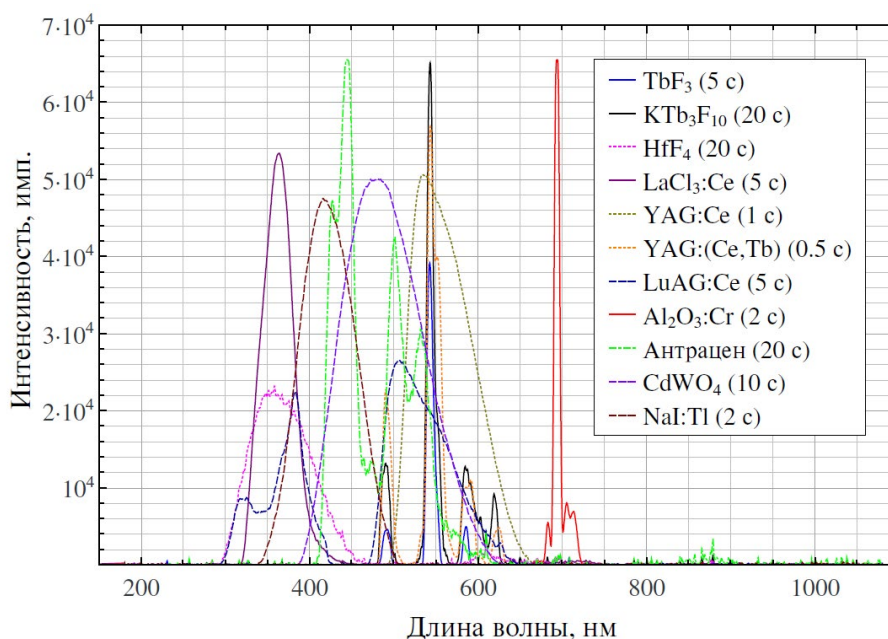


Рис. 2. Спектры рентгенофлуоресценции некоторых сцинтилляционных кристаллов. В скобках указано время накопления сигнала спектрометром.

методу Чохральского выращивание осуществляется из иридиевых тиглей на ориентированную затравку. Основной недостаток метода Чохральского связан с высокой себестоимостью выращиваемых кристаллов, обусловленной использованием дорогостоящих иридиевых тиглей. Можно отметить также присущие данному методу структурные неоднородности получаемых кристаллов, а также сложный профиль напряжений в их поперечном сечении, что связано с эффектами “гранного” роста [9]. Грани формируются на тех участках вогнутой в сторону расплава фазовой границы, которые параллельны кристаллографическим плоскостям. В результате лишь часть выращенных кристаллов пригодна для использования. Известным производителем сцинтилляционных кристаллов YAG:Ce (а также монокристаллов $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$) является фирма CRYTUR (Чехия) [10].

Другим достаточно известным методом выращивания синтетических гранатов и других оксидных монокристаллов является разработанный в России метод горизонтальной направленной кристаллизации (ГНК) или по имени его основателя — метод Багдасарова [8]. По данному методу выращивание достаточно крупных кристаллов плоской геометрии размером до $200 \times 80 \times 30 \text{ мм}^3$ осуществляется в одноразовых молибденовых контейнерах в вакууме или контролируемой атмосфере (Ar, N_2 , с добавлением H_2). Возможна также кристаллизация в восстановительной атмосфере в присутствии CO_2 [11].

В методе Багдасарова плоская геометрия контейнера с высокой площадью расплава определяет ряд его особенностей, основной из которых является нарушение стехиометрии расплава в процессе кристаллизации. Последнее обстоятельство особенно существенно при проведении кристаллизационных процессов в вакууме. Вполне естественно, что характер и концентрация дефектов структуры (например вакансий в анионной и катионной подрешетке) могут существенно отличаться от кристаллов, выращенных иными методами.

Для кристаллов YAG при кристаллизации методом Багдасарова характерно преимущественное испарение алюминия и кислорода, приводящее к образованию F -центров с поглощением в УФ-области спектра (200–240 нм) [12, 13]. К другим типам дефектов синтетических

кристаллов алюмогранатов, активно изучаемым в последние годы, относятся так называемые дефекты замещения (anti-site defects), когда часть катионов, например Y в YAG, занимают октаэдрические позиции алюминия в кристаллической решетке. Впервые такие нарушения идеальной структуры YAG были рассмотрены в работе [14], причем концентрация дефектов замещения может быть сравнима с концентрацией активатора (0.25 ат.% для Y_{Al}). Формирование упомянутых выше и иных дефектов кристаллической структуры в значительной степени зависит от метода и технологических условий выращивания [15]. Высокая температура выращивания кристаллов гранатов из расплавов способствует формированию дефектов замещения, которые активно исследуются при анализе свойств характеристик сцинтилляционных кристаллов гранатов, активированных ионами Ce^{3+} , поскольку оказывают влияние на эффективность и кинетику сцинтилляций [16, 17].

Кристаллы, выращиваемые методом Багдасарова, обладают низким уровнем остаточных напряжений и высокой оптической однородностью, а сам метод характеризуется относительной простотой и низкой себестоимостью. По методу ГНК принципиально возможно выращивание кристаллов с широкой рабочей апертурой, перспективных для использования в детекторах для рентгеновской томографии [18].

Перечисленные достоинства метода ГНК, а также наличие ростовой аппаратуры и соответствующей инфраструктуры обусловили его использование в наших исследованиях.

По названным причинам мы применили метод направленной горизонтальной кристаллизации (метод Багдасарова) для выращивания иттрий-алюминиевых гранатов с церием и тербием. Схема метода Багдасарова и фотография установки для выращивания кристаллов показаны на рис. 2.

Кристаллы YAG:(Ce) и YAG:(Ce,Tb), использованные в настоящей работе, выращивались в вакууме из предварительно синтезируемой шихты, полученной путем сплавления исходных оксидов. Несмотря на то, что кристаллы YAG с различными редкоземельными активаторами (Nd, Er, Yb) успешно выращивались в вакууме методом Багдасарова [8], мы при отработке методики выращивания столкнулись с определен-

ными трудностями, вызванными значительно более высокой летучестью оксида церия CeO_2 по сравнению с оксидами неодима, эрбия и иттербия. По данным работ [19, 20], давление CeO_2 при температуре кристаллизации YAG, равной 1950°C , составляет 77 Па, тогда как давление NdO при тех же условиях равно примерно 0.25 Па. Эти данные свидетельствуют о значительно большей летучести оксида церия по сравнению с оксидом неодима. С проблемой летучести CeO_2 , а также церия из расплава мы встретились в экспериментах по выращиванию кристаллов YAG в вакууме по методу Багдасарова. Ситуация осложнялась также большой площадью поверхности расплава при данном методе выращивания.

Для технологии выращивания кристаллов YAG:Ce также актуальна задача достижения высокой равномерности распределения активатора в связи с низким коэффициентом распределения Ce ($K \sim 0.1$) при кристаллизации из расплава [18].

Для получения необходимой концентрации ионов Ce^{3+} в кристаллах были приняты меры, позволившие получить концентрацию ионов Ce^{3+} в предварительно синтезированной шихте YAG в диапазоне от 1 до 2.5 ат. % (замещения ионов Y). Из такой шихты были выращены кристаллы с концентрацией ионов Ce^{3+} от 0.1 до 0.4 ат. %. Концентрация ионов Ce^{3+} в кристаллах контролировалась по спектральной методике, рассмотренной в работе [21]. При концентрации ионов Ce^{3+} , равной 0.1 ат. %, были получены кристаллы с рабочей зоной размером $50 \times 80 \times 15 \text{ мм}^3$ и неравномерностью распределения ионов Ce^{3+} по длине заготовки, не превышающей 10%. При выращивании кристаллов YAG:(Ce,Tb) с концентрацией Tb в диапазоне от 2 до 8 ат. % не возникали дополнительные трудности в связи с меньшим ионным радиусом и значительно более высоким коэффициентом распределения тербия в YAG, равным примерно 0.9 [22]. Дополнительно проведенные исследования показали, что световыход полученных методом Багдасарова в вакууме монокристаллов составляет 22 000–25 000 фот./МэВ (для образцов с концентрацией ионов Ce^{3+} , равной 0.1–0.4 ат. %). Пример кинетики затухания рентгенолюминесценции образца с концентрацией ионов Ce^{3+} , равной 0.4 ат. %, приведен на рис. 4.

Кинетика рентгенолюминесценции хорошо аппроксимируется единственной экспонентой со временем затухания порядка 70 нс. Компоненты со временем около 1 мкс, связанной со струк-

турными дефектами кристаллов YAG, практически нет, что хорошо согласуется с данными работы [23], в которой исследовались образцы кристаллов, полученных “закалочным методом”.

Кинетика люминесценции кристаллов YAG:(Ce,Tb) соответствует переходам $^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_j$ ионов Tb^{3+} и характеризуется экспонентой с постоянной, равной примерно 3.12 мс, по данным [24].

4. ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЕШЕНИЯ И КОНТРАСТНОСТИ ПОЛУЧАЕМЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В лаборатории рефлектометрии и малоуглового рассеяния НИЦ “Курчатовский институт” разработан детектор для регистрации двумерных рентгеновских изображений с микронным разрешением (рис. 5). В состав детектора

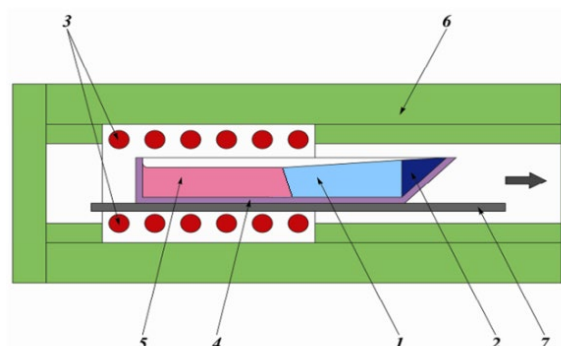


Рис. 3. Схема метода Багдасарова: 1 – кристалл, 2 – затравка, 3 – нагреватель, 4 – молибденовый контейнер, 5 – расплав, 6 – экранная теплоизоляция, 7 – волокуша.

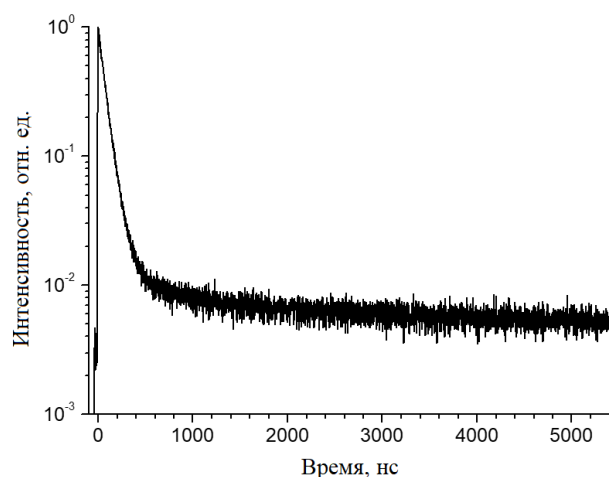


Рис. 4. Зависимость интенсивности рентгенолюминесценции образца YAG:Ce от времени.

входят: КМОП-матрица, оптическая система, люминесцентный экран. Используемая матрица с фронтальным типом засветки (FSI) имеет формат 2064×1544 пикселей с размером пикселя 3.45 мкм . Емкость потенциальной ямы составляет 1800 электронов. Детектор обеспечивает возможность получения до 50 кадров в секунду.

Тестирование сцинтиллятора $\text{YAG:}(\text{Ce},\text{Tb})$ толщиной около 100 мкм в качестве люминесцентного экрана проводилось на лабораторном микротомографе ТОМАС [25], разработанном в лаборатории рефлектотрии и малоуглового рассеяния ФНИЦ “Кристаллографии и фотоники” РАН [25] с использованием разработанного детектора. Источником излучения служила рентгеновская трубка с молибденовым анодом. Ускоряющее напряжение — 40 кВ , ток — 40 мА . Эксперимент проводился в “белом” пучке, т.е. с использованием тормозного излучения и без его монохроматизации. В качестве тест-объектов для получения изображения использовались золотые сетки с размером проволоки 55 и 6 мкм , которые устанавливались непосредственно перед сцинтиллятором $\text{YAG:}(\text{Ce},\text{Tb})$. При рентгеновском облучении входное окно детектора закрывалось тонким черным колпачком. Геометрия съемки была следующая: расстояние от источника до сетки 175 см , расстояние от сет-

ки до КМОП-матрицы составляло 18 см (без увеличения), а расстояние от сетки до КМОП-матрицы составляло 26 см при максимальном увеличении. Время экспозиции составляло от 0.1 до 60 с . Результаты эксперимента представлены на рис. 6, 7.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты определенно демонстрируют возможность применения монокристаллов $\text{YAG:}(\text{Ce},\text{Tb})$ в качестве сцинтилляторов для двумерных рентгеновских детекторов, применимых, например, в рентгеновской микротомографии. Их эффективность и время затухания люминесценции ($\tau \sim 3 \text{ мс}$) удовлетворяют условиям проведения таких экспериментов в лабораторных условиях. В частности, удается получить достаточно четкое изображение тест-объектов с пространственным разрешением на уровне шести микрометров за 10 с . Повышение пространственного разрешения требует изготовления более тонких пластинок из этих материалов, что является нашей ближайшей задачей. С другой стороны, более быстрая регистрация изображений требует и большей интенсивности излучения, что реализуется с использованием синхротронного излучения. В таких случаях перспективно применение более



Рис. 5. Фотография детектора для рентгеновской микротомографии.

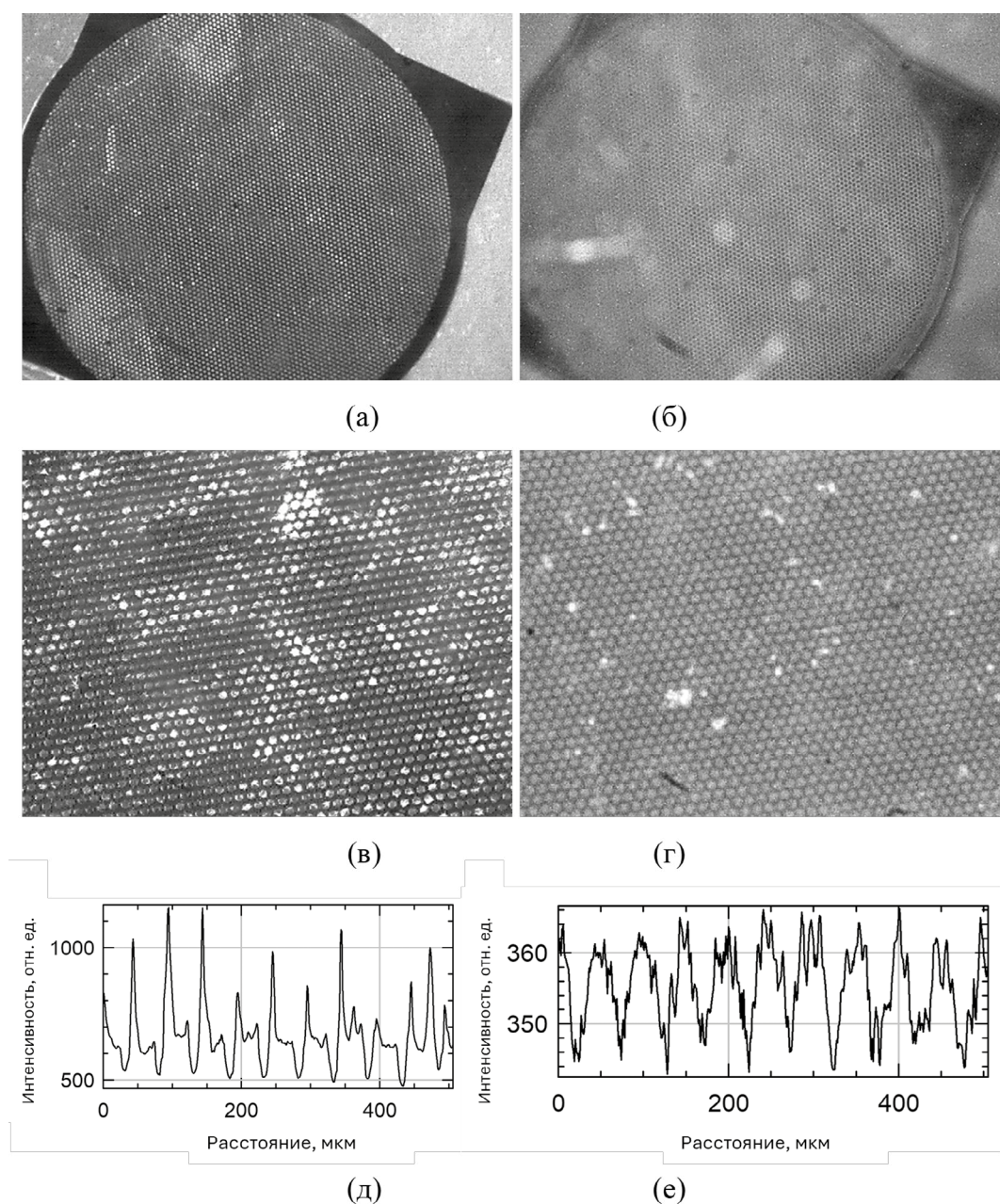


Рис. 6. Изображение сетки с размером проволоки 55 мкм: **а** — в видимом свете без увеличения, экспозиция 0.1 с; **б** — в рентгеновском излучении без увеличения, экспозиция 10 с; **в** — в видимом свете с максимальным увеличением, экспозиция 0.1 с; **г** — в рентгеновском излучении с максимальным увеличением, экспозиция 10 с; **д, е** — сечения изображений **в, г**.

быстрого сцинтиллятора из кристаллов YAG:Ce. Эти кристаллы, хотя и менее эффективны, но обладают существенно лучшим быстродействием ($\tau \sim 70$ нс).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Д.Н. Каримову и В.А. Постникову (НИЦ “Курчатовский институт”), а также Н.Н. Колесникову (ИФТТ

РАН) за предоставление образцов для исследований.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа в части изготовления двумерного рентгеновского детектора выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-72-30002), в части изготовления сцинтилляторов — в рамках государственного

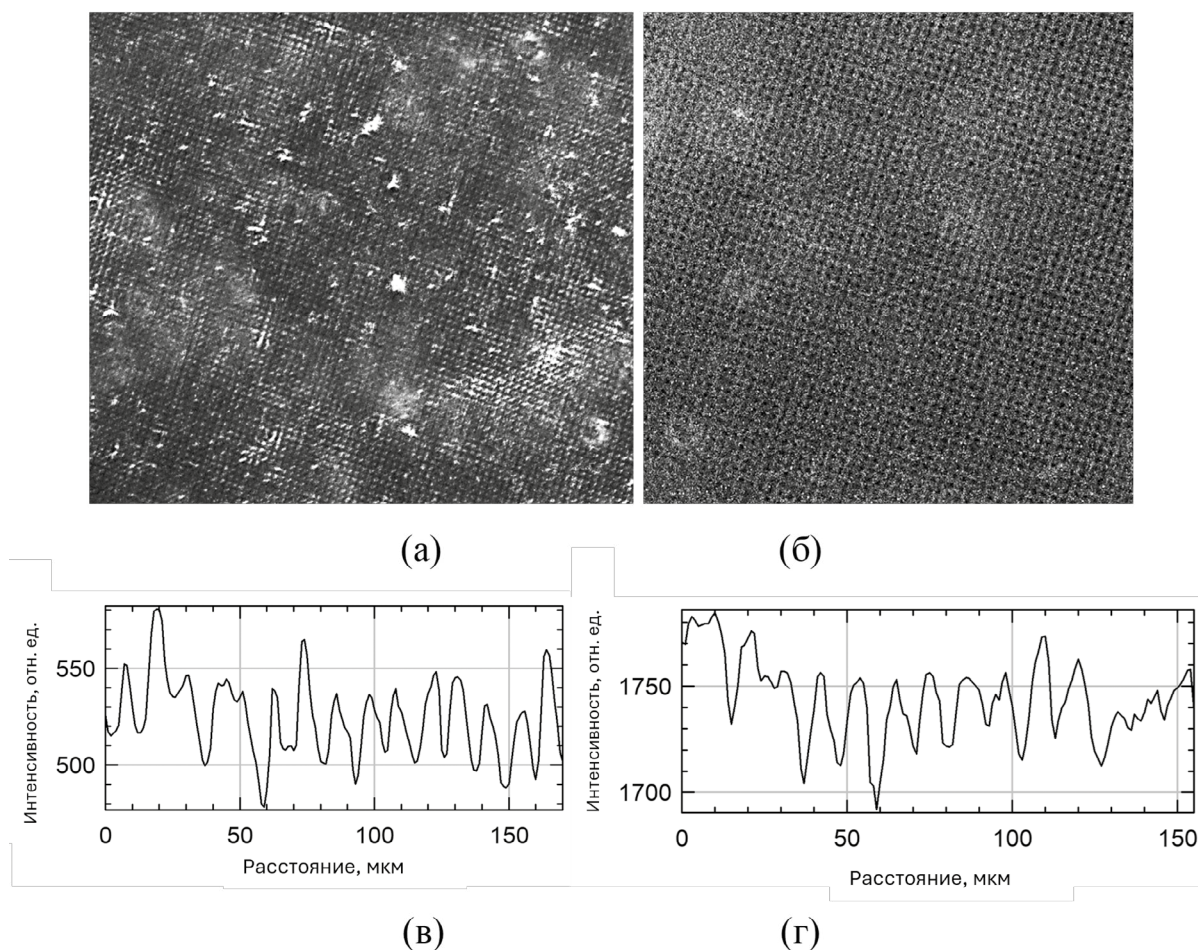


Рис. 7. Изображение сетки с размером проволоки 6 мкм: **а** — в видимом свете с максимальным увеличением, экспозиция 0.1 с; **б** — в рентгеновском излучении с максимальным увеличением, экспозиция 60 с; **в, г** — сечения изображений **а, б**.

задания НИЦ “Курчатовский институт” и в части изучения свойств кристаллов сцинтилляторов — в рамках задания Министерства науки и высшего образования России (грант № 075-15-2024-637).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кривоносов Ю.С., Чукалина М.В., Бузмаков А.В., Асадчиков В.Е., Русаков А. А., Мариянац А.О., Попов В.К., Занин И.О., Кулик В.Л. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 1. С. 26.
<https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-1-26-31>
2. Tegze M., Faigel G. // Nature. 1996. V. 380. № 6569. P. 49.
<https://doi.org/10.1038/380049a0>
3. Kapetanakis E., Douvas A.M., Argitis P., Normand P. // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2013. V. 5. № 12. P. 5667.
<https://doi.org/10.1021/am401016n>
4. Luo Z., Moch J.G., Johnson S.S., Chen C.C. // Curr. Nanosci. 2017. V. 13. № 4. P. 364.
<https://doi.org/10.2174/1573413713666170329164615>
5. Deglinc J., Kazemzadeh F., Cho D., Clausi D.A., Wong A. // Sci. Rep. 2016. V. 6. № 1. P. 28665.
<https://doi.org/10.1038/srep28665>
6. Linares R.C. // Solid State Commun. 1964. V. 2. P. 229.
[https://doi.org/10.1016/0038-1098\(64\)90369-2](https://doi.org/10.1016/0038-1098(64)90369-2)
7. Mihokova E., Nikl M., Mares J.A., Beitlerova A., Vedda A., Nejezchleb K., Blazek K., D'Ambrosio C.J. // Luminescence. 200. V. 126. № 1. P. 77.
<https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2006.05.004>
8. Багдасаров Х.С. Высокотемпературная кристаллизация из расплава. Москва: Физматлит, 2004. ISBN 5-9221-0482-9
9. Петросян А.Г. Сб. Физика и спектроскопия лазерных кристаллов. Москва: Наука, 1986.
<https://www.crytur.com/products>
10. Данько А.Я., Пузилов В.М., Семиноженко В.П., Сидельникова Н.С. Технологические основы выращивания лейкоапфира в восстановительных условиях. Харьков: ИСМА, 2009.

11. Зоренко Ю.В., Савчин В.П., Горбенко В.И., Возняк Т.И., Зоренко Т.Е., Пузиков В.М., Данько А.Я., Нижанковский С.В. // ФТТ. 2011. Т. 53. № 8. С. 1542.
12. Нижанковский С.В., Данько А.Я., Зеленская О.В., Тарасов В.А., Зоренко Ю.В., Пузиков В.М., Гринь Л.А., Трушковский А.Г., Савчин В.П. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. № 20. С. 77.
13. Ashurov M.Kh., Voronko Yu.K., Osiko V.V., Sobol A.A. // Phys. Stat. Sol. (A). 1977. V. 42. P. 101. <https://doi.org/10.1002/pssa.2210420108>
14. Zorenko Y., Gorbenko V., Zorenko T., Kuklinski B., Grinberg M., Wiśniewski K., Bilski P. // Opt. Mater. 2014. V. 36. № 10. P. 1680. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2014.01.013>
15. Khanin V.M., Vruble I.I., Polozkov R.G., Venevtsev I.D., Rodnyi P.A., Tikhvatulina T., Chernenko K., Drozdowski W., Witkowski M.E., Makowski M., Dorogin E.V., Rudin N.V., Ronda C., Wieczorek H., Boerekamp J., Spoor S., Shelykh I.A., Meijerink A.J. // Phys. Chem. C. 2019. V. 123. № 37. P. 22725. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b05169>
16. Pankratov V., Grigorjeva L., Millers D., Chudoba T. // Radiat. Meas. 2007. V. 42. P. 679. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2007.02.046>
17. Zhao G., Zeng X., Xu J., Xu Y., Zhou Y. J. // Cryst. Growth. 2003. V. 253. № 1. P. 290. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(03\)01017-0](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(03)01017-0)
18. Kurapova O.Yu., Shugurov S.M., Vasil'eva E.A., Konakov V.G., Lopatin S.I. // J. Alloys Compd. 2019. V. 776. P. 194. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.10.265>
19. Sevastyanov V.G., Simonenko E.P., Simonenko N.P., Stolyarova V.L., Lopatin S.I., Kuznetsov N.T. // Eur. J. Inorg. Chem. 2013. V. 26. P. 4636. <https://doi.org/10.1002/ejic.201300253>
20. Кварталов В.Б., Каневский В.М., Федоров В.А., Буташиин А.В. // Успехи в химии и химической технологии. Сб. науч. тр. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева. 2022. Т. XXXVI. № 7. С. 70.
21. Tachibana M., Iwanade A., Miyakawa K. // J. Cryst. Growth. 2021. V. 568–569. P. 126191. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2021.126191>
22. Федоров В.А., Антонов Е.В., Вeneвцев И.Д., Каневский В.М., Набатов Б.В., Салтанова Е.С. // Кристаллография. 2024. Т. 69. № 2. С. 345. <https://doi.org/10.31857/S0023476124020187>
23. Liu J., Song Q., Li D., Ding Y., Xu X., Xu J. Opt. Mater. 2020. V. 106. P. 110001. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110001>
24. Бузмаков А.В., Асадчиков В.Е., Золотов Д.А., Роцин Б.С., Дымшиц Ю.М., Шишков В.А., Чукалина М.В., Ингачева А.С., Ичалова Д.Е., Кривоносов Ю.С., Дьячкова И.Г., Балцер М., Касселе М., Чилингарян С., Копманн А. // Кристаллография. 2018. Т. 63. № 6. С. 1007. <https://doi.org/10.1134/S0023476118060073>