

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ЭКРАНОВ В СОСТАВЕ ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩЕЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ МИКРОТОМОГРАФИИ

М.М. Синицына¹⁾, В.Е. Асадчиков²⁾, В.А. Федоров²⁾, А.В. Бузмаков²⁾,
Б.С. Рошин²⁾, И.Г. Дьячкова²⁾, С.В. Кузин^{2), 3)}

¹⁾Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Ленинские горы 1, Москва 119991, Россия, sinitsynamm@gmail.com

²⁾Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
Ленинский пр. 59, Москва 119333, Россия,
asad@crys.ras.ru, fedorov-metrology@yandex.ru,
buzmakov@gmail.com, ross@crys.ras.ru, sig74@mail.ru

³⁾Институт космических исследований РАН,
ул. Профсоюзная 84/32, Москва 117997, Россия, kuzin.s@crys.ras.ru

Разработка высокоэффективных рентгеновских детекторов с микронным пространственным разрешением является актуальной задачей, особенно в условиях ограниченного доступа к импортным компонентам. В работе представлены результаты тестирования и оптимизации сцинтилляторов для использования в составе детектора для лабораторного микротомографа с CMOS-матрицей и оптическим увеличением. Особое внимание уделено сравнению характеристик монокристаллических сцинтилляторов на основе YAG:(Ce,Tb) с коммерчески доступными экранами типа DRZ-High. Показано, что даже при толщине до 475 мкм сцинтилляторы на основе YAG:(Ce,Tb) позволяют регистрировать объекты с размером структур до 6 мкм. Проведен анализ факторов, влияющих на выбор сцинтиллятора, включая световой выход, толщину, спектральное соответствие чувствительности CMOS-матрицы и качество обработки. Полученные результаты создают предпосылки для разработки отечественных детекторов с высоким разрешением и в то же время указывают на необходимость разработки технологии изготовления сцинтилляторов.

Ключевые слова: детектор; сцинтиллятор; иттрий-алюминиевый гранат; микротомография; CMOS-матрица.

STUDY OF THE EFFICIENCY OF DIFFERENT SCINTILLATION SCREENS IN THE DETECTOR FOR HIGH-RESOLUTION X-RAY MICROTOMOGRAPHY

Maria Sinitsyna¹⁾, Victor Asadchikov²⁾, Vladimir Fedorov²⁾, Alexey Buzmakov²⁾,
Boris Roshchin²⁾, Irina Dyachkova²⁾, Sergey Kuzin^{2), 3)}

¹⁾Lomonosov Moscow State University,
1 Leninskie Gory, 119991 Moscow, Russia, sinitsynamm@gmail.com

²⁾National Research Center Kurchatov Institute,
59 Leninsky Ave., 119333 Moscow, Russia,
asad@crys.ras.ru, fedorov-metrology@yandex.ru,
buzmakov@gmail.com, ross@crys.ras.ru, sig74@mail.ru

³⁾Institute of Space Research, Russian Academy of Sciences,
84/32 Profsoyuznaya Str, 117997 Moscow, Russia, kuzin.s@crys.ras.ru

Development of high-performance X-ray detectors with micron spatial resolution is an urgent task, especially in conditions of limited access to imported components. In this work we tested a detector designed for high-resolution

X-ray microtomography. The results of testing and optimization of scintillators for use in the detector for laboratory microtomograph with CMOS-matrix having the format of 2064×1544 pixels with pixel size of 3.45×3.45 microns and optical magnification of about 3 times are presented. As a result of selection and experimental testing of scintillators the optimal material was chosen - YAG (yttrium-aluminum garnet) activated by cerium and terbium ions. Crystals for scintillators were grown by Bagdasarov method. The conducted studies confirmed their suitability: an image with a resolution of about six micrometers was obtained using optical magnification (for scintillators of different thicknesses from 100 to 475 μm), which indicates the high efficiency of the proposed approach. Special attention is paid to the comparison of the characteristics of single-crystal scintillators based on YAG:(Ce,Tb) with a commercially available DRZ-High type screen made on the basis of gadolinium oxysulfide deposited on a polymer base and having a phosphor thickness of 320 μm . The surface quality of DRZ-High was not good enough for high-resolution imaging tasks. The surface analysis showed a pronounced roughness, reaching the visually distinguishable structure, which leads to significant optical distortions and blurring of the image. However, even for the created scintillators based on YAG:(Ce,Tb) the problems related to the inhomogeneity of dopant distribution were revealed. This inhomogeneity is manifested in the form of local zones of increased brightness, which can be caused by the concentration of luminescent centers. An additional difficulty is introduced by poor surface quality. Elimination of these defects requires further optimization of the grinding and polishing process. The obtained results demonstrate the potential for creation of domestic detectors with high resolution and emphasize the need for further improvement of scintillator manufacturing technology.

Keywords: detector; scintillator; yttrium-aluminum garnet; microtomography; CMOS-matrix.

Введение

Разработка высокоразрешающих рентгеновских детекторов – ключевая задача в микротомографии. Наиболее широко применяются детекторы на основе CMOS- или CCD-матриц в сочетании со сцинтилляторами, которые преобразуют рентгеновское излучение в оптическое. Использование проекционной оптики позволяет получать изображение с высоким пространственным разрешением. Качество полученного изображения сильно зависит от параметров сцинтилляционного материала. Настоящая работа направлена на разработку ярких и тонких монокристаллических сцинтилляторов, совместимых с CMOS-матрицами, обеспечивающих разрешение порядка 1 мкм при размере пикселя 3.45 мкм и оптическом увеличении около 3. Это важно как для повышения качества диагностики, так и для реализации стратегии технологического импортозамещения.

Результаты и их обсуждение

Наиболее важными свойствами сцинтиллятора, подходящего для экспериментов с высоким разрешением, являются световой выход (яркость), толщина активного слоя, спектральный состав люминесценции. На основании исследований [1] нами

сделан вывод, что монокристалл иттрий-алюминиевого граната ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$), легированный церием и тербием (YAG:(Ce,Tb)) весьма перспективен для создания детектора с высоким пространственным разрешением (рис. 1).

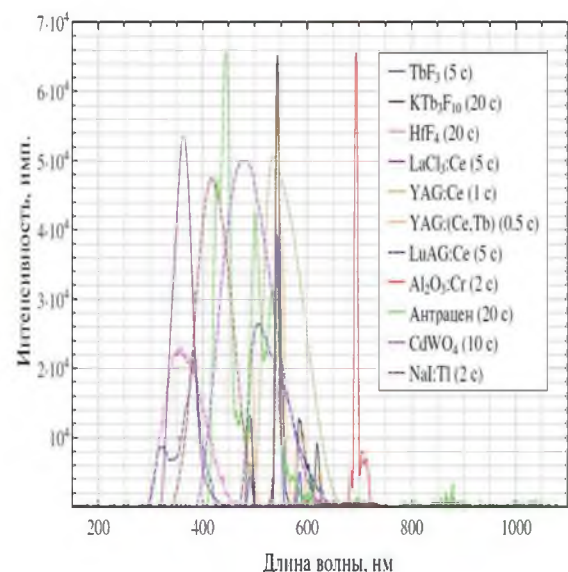


Рис. 1. Спектры излучения некоторых сцинтилляционных кристаллов [1]. В скобках указано время накопления сигнала спектрометром

Выбранный сцинтиллятор является одним из самых ярких, а максимум его флуоресцентного спектра близок к максимуму спектральной чувствительности CMOS-матрицы.

Помимо подбора подходящего сцинтиллятора остро стоит проблема получения гладкой, оптически полированной поверхности, поскольку именно качество поверхности определяет пространственное разрешение и качество изображения.

В данной работе тестировались кристаллы, выращенные методом Багдасарова [2]. Были изготовлены образцы сцинтилляторов с диаметром 19 мм и толщиной от 100 до 475 мкм для подбора оптимального баланса между их световыходом и разрешением детектора.

Тестирование сцинтилляторов в качестве люминесцентных экранов проводилось на лабораторном рентгеновском микротомографе «ТОМАС» [3] с использованием разработанного двумерного детектора. Источником излучения служила рентгеновская трубка с анодом Мо ($K_{\alpha}=17.5$ кэВ). Ускоряющее напряжение – 40 кВ, ток – 40 мА. Эксперименты проводились как с использованием тормозного излучения, так и с монохроматором из пиролитического графита. В качестве тест-объектов были использованы золотые сетки с размером проволоки 55 и 6 мкм.

Были получены изображения (рис. 2) сеток с использованием сцинтилляторов YAG:(Ce,Tb) толщиной 100 и 475 мкм.

В обоих случаях – как при использовании тонкого сцинтиллятора (100 мкм), так и толстого (475 мкм) – удалось визуализировать структуру золотой сетки с периодом 6 мкм на рентгеновском изображении, благодаря использованию объектива с увеличением.

Таким образом, несмотря на увеличение размытия с ростом толщины сцинтиллятора, в условиях применения объектива с трехкратным увеличением даже сцинтиллятор толщиной 475 мкм позволил визуализировать детали размером до 6 мкм. Сравнительный анализ также показывает, что более толстый сцинтиллятор обладает большей световой отдачей, что позволило

получить изображение 55 мкм сетки в монохроматическом пучке за разумное время экспозиции.

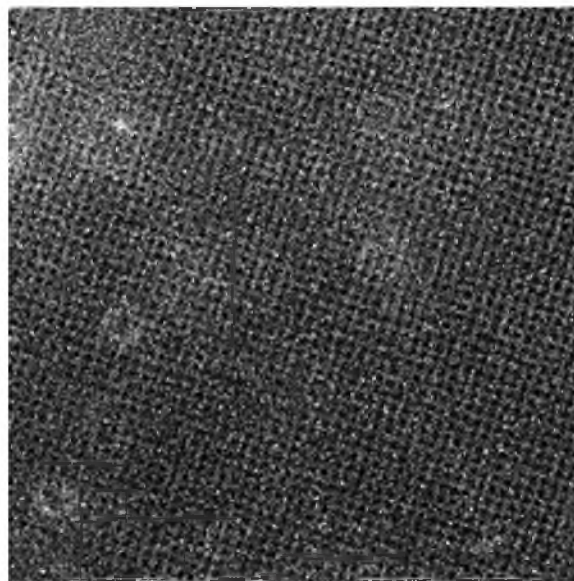


Рис. 2. Изображение сетки с размером проволоки 6 мкм в рентгеновском излучении с максимальным увеличением, экспозиция 60 с. Изображения получены с помощью YAG:(Ce,Tb) толщиной 100 мкм в «белом» пучке

В работе было проведено сравнение полученных изображений золотых сеток с использованием YAG:(Ce,Tb) и серийного сцинтилляционного экрана серии DRZ-High производства компании MCI Optonix, LLC. Показано, что при использовании DRZ-High изображение тест-объекта оказалось неразличимым, что обусловлено заметной шероховатостью поверхности сцинтилляторной пленки и поглощением излучения в ее подложке. В отличие от него, YAG:(Ce,Tb), несмотря на отдельные дефекты, позволил получить четкое изображение структуры с шагом 6 мкм. Это подтверждает преимущество монокристаллов в задачах высокоразрешающей рентгеновской визуализации.

Заключение

Проведенное исследование позволило определить оптимальный тип сцинтиллятора для задач высокоразрешающей микротомографии и подтвердить его эффек-

тивность в условиях лабораторного эксперимента. Полученные данные указывают на потенциал монокристаллов YAG:(Ce,Tb) при соответствующем подборе толщины. Выявленные ограничения, связанные с неоднородностью легирования и качеством обработки поверхности, определяют направления дальнейшей доработки технологии.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Библиографические ссылки

1. Асадчиков В.Е., Федоров В.А., Григорьев А.Ю., Бузмаков А.В., Рошин Б.С., Дьячкова И.Г. и др. Сцинтилляторы для двумерных рентгеновских детекторов из монокристаллов иттрий-алюминиевых гранатов, активированных церием и тербием. *Приборы и техника эксперимента* 2024; (6): 90-99.
2. Багдасаров Х.С. Высокотемпературная кристаллизация из расплава. Москва: Физматлит; 2004.
3. Бузмаков А.В., Асадчиков В.Е., Золотов Д.А., Рошин Б.С., Дымшиц Ю.М., Шишков В.А. и др. *Кристаллография* 2018; 63(6): 1007.