

Исследование эффективности различных сцинтилляторов для двумерного рентгеновского детектора

И.Г. Дьячкова, М.М. Сеницына, В.Е. Асадчиков, А.В. Бузмаков, Д.А. Золотов, Б.С. Рошин, В.А. Федоров

Отделение “Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова” Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники
НИИ “Курчатовский институт”

123098 Москва, площадь Академика Курчатова, 1

Разработка эффективных детекторов рентгеновского излучения остается ключевой задачей в области микротомографии и рентгеновской визуализации. В области регистрации рентгеновского излучения широкое распространение получили детекторы непрямого счета. Качество изображения при этом во многом определяется характеристиками сцинтиллятора. Поэтому задача разработки тонких и ярких сцинтилляторов с гладкой поверхностью, подходящих для высокоразрешающей микротомографии, становится особенно актуальной в условиях ограниченного доступа к импортным рентгеновским детекторам.

Целью работы являлось создание рентгеновского детектора непрямого счета для высокоразрешающей микротомографии на основе отечественных материалов и комплектующих, а также исследование сцинтилляторов для использования их в составе детектора для достижения максимального пространственного разрешения. Для этого решались следующие задачи: протестировать полученные методом горизонтальной направленной кристаллизации серии монокристаллов YAG:Ce,Tb, LuAG:Ce,Tb и YAG:Tb с различным содержанием активаторов (Ce^{3+} , Tb^{3+}) и разной толщиной (от 100 до 1250 мкм); изучить их рентгенолюминесцентные свойства, оптическое качество и дефекты поверхности (различная обработка); собрать детектор на основе CMOS-матрицы, объектива и сцинтилляционного кристалла; провести его испытания на тестовых объектах и биологических образцах для оценки пространственного разрешения и пригодности к использованию в микротомографии.

В ходе выполнения работы был разработан и протестирован рентгеновский детектор непрямого счета, созданный на базе CMOS-матрицы Sony с размером пикселя 3,45 мкм, оптической системы в виде объектива с максимальным увеличением 2,7 и выращенных в КККиФ НИИ «Курчатовский институт» сцинтилляторов.

Установлено, что YAG:Ce,Tb обладает максимальной яркостью, однако характеризуется сильными дефектами поверхности (царапины и шерховатости), а также наличием на рентгеновских изображениях (полученных с его помощью) множественных ярких пятен (артефактов), связанных с неоднородным распределением церия. LuAG:Ce,Tb содержит меньшее количество артефактов на изображениях благодаря меньшей концентрации церия, однако его яркость ниже. YAG:Tb при концентрации тербия 4–8% демонстрирует высокую однородность свечения, отсутствие ярких пятен на изображениях и хорошее качество поверхности. Максимум световыход достигается при концентрации тербия равной 6%.

Выявлено влияние концентрации активатора на однородность свечения. Для сцинтилляторов YAG:Ce,Tb и LuAG:Ce,Tb появление локальных областей повышенной яркости на рентгеновских изображениях обусловлено неравномерным распределением активатора и образованием микронеоднородностей в объеме кристалла. В случае сцинтиллятора YAG:Tb подобные дефекты практически отсутствуют при концентрации тербия 4–8%, но наблюдаются уже при концентрации 10%.

Установлено, что при использовании прозрачного толстого монокристаллического сцинтиллятора (1200 мкм) оптическое увеличение (в 2,7 раз) позволяет сохранить высокое пространственное разрешение (порядка 9–10 мкм). Поэтому наличие у детектора оптического увеличения позволяет эффективно применять прозрачные монокристаллические сцинтилляторы с толщиной, превышающей глубину резкости объектива (300 мкм), без критической потери разрешающей способности детектора. Оптическое увеличение является необходимым условием для достижения высокого пространственного разрешения (9–10 мкм). При съемке без увеличения разрешение ухудшается примерно в 2 раза (21–22 мкм).

В результате исследования различных образцов сцинтилляторов по совокупности характеристик наилучшим для использования в составе разработанного детектора признан образец сцинтиллятора YAG:Tb с концентрацией тербия 6% и толщиной 1200 мкм. Он обеспечивает пространственное разрешение детектора не хуже 6 мкм (при наличии оптического увеличения в 2,7 раз), высокий контраст, достаточную яркость для экспозиции 10 сек, и отсутствие на рентгеновских изображениях паразитных светящихся артефактов, связанных с дефектами поверхности и неоднородным распределением активирующей примеси.

Разработанный детектор успешно протестирован на биологических образцах – интактной лапке и регенерировавшем хвосте (после ампутации регенерировавший в условиях космического полета образец) тритона. Полученные проекционные изображения позволили выявить костные и хрящевые структуры (карпальные кости, позвонки) и мягкие ткани.

Работа демонстрирует возможность создания конкурентоспособной отечественной аппаратуры в условиях импортозамещения.

Работа проведена в рамках государственного задания НИИ «Курчатовский институт» (в части изготовления сцинтилляторов) и в рамках задания Министерства науки и высшего образования России (грант № 075-15-2025-458) (в части изучения свойств кристаллов сцинтилляторов).