

УДК 539.1.06

МНОГОМОДОВАЯ РЕНТГЕНОВСКАЯ ТОМОГРАФИЯ НА СТАНЦИИ “МЕДИАНА” КУРЧАТОВСКОГО ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2012 г. К. М. Подурец, Д. К. Погорелый, А. А. Калоян, Е. С. Коваленко, В. Г. Кон

НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия

Поступила в редакцию 12.01.2012 г.

Применение синхротронного излучения в рентгеновской томографии позволяет в широких пределах варьировать условия съемки благодаря непрерывному спектру, высокой яркости и коллимации пучка. В данной работе описаны возможности многомодовой рентгеновской томографии на станции “Медиана” Курчатовского источника синхротронного излучения, включающие в себя томографию и микрофотографию в белом и “розовом” пучках, съемку в монохроматическом пучке, а также съемку с применением осевого и рефракционного фазоконтрастных методов. Представлены результаты, полученные для разных объектов и разных условий съемки.

ВВЕДЕНИЕ

Рентгеновская томография как метод получения трехмерных изображений объектов широко используется в таких областях исследований, как неразрушающий контроль изделий, биология и медицина, минералогия и палеонтология и многих других. Томографическая съемка заключается в регистрации с помощью одно- или двухкоординатного детектора серии картин от объекта на просвет при повороте объекта вокруг оси, перпендикулярной пучку, в угловом диапазоне от 0 до 180 градусов с последующей математической обработкой – восстановлением объемного изображения. В рентгеновской томографии всегда существует задача выбора оптимальных условий съемки, таких как пространственное разрешение, поле зрения, энергия излучения, а также применения фазочувствительных методов для усиления контраста. Проведение измерений на синхротронном излучении позволяет в широких пределах варьировать условия съемки благодаря непрерывному спектру, высокой яркости и коллимации пучка. В данной работе описаны и иллюстрированы примерами возможности многомодовой рентгеновской томографии на станции “Медиана” Курчатовского источника синхротронного излучения.

МЕТОДИКА

Особенностью станции “Медиана” является то, что в экспериментальную зону выведен белый пучок из накопителя. Спектр излучения из источника при номинальной энергии электронов 2.5 ГэВ с учетом бериллиевых окон имеет максимум около 13 кэВ, а его высокоэнергетическая часть распространяется до значений 80 кэВ и больше, быстро спадая в этом диапазоне. Изменение спектра из-

лучения, падающего на образец, возможно за счет монохроматизации его кристаллами, применения фильтров и зеркал, однако возможно и изменение спектра за счет изменения параметров источника. Так, при энергии электронов в накопителе 1.6 ГэВ вместо номинального значения 2.5 ГэВ количество высокоэнергетических фотонов резко сокращается. Мягкая составляющая спектра подавляется бериллиевыми окнами канала вывода и дополнительными алюминиевыми фильтрами, в результате спектр пучка СИ имеет вид пика с энергией максимума 12 кэВ и с шириной на половине высоты около 6 кэВ. Несмотря на потерю максимальной интенсивности на два порядка величины, оценка интегрального выигрыша при работе с таким “розовым” пучком дает величину примерно 300 раз по сравнению с монохроматическим пучком, сходный вид спектра дает отражение пучка от зеркала. На рис. 1 показаны расчетные спектры излучения для пучка из накопителя, пучка после медного фильтра и “розового” пучка.

По ходу пучка в домике расположены оптическая скамья, предназначенная для оперативного монтажа щелей, устройств позиционирования образцов и детекторов, и установка для рефракционной интроскопии [1] (рис. 2). Простота изменения экспериментальной схемы вместе с управлением пучком дают возможность использовать разные способы подготовки пучка для эксперимента и, соответственно, варьировать параметры эксперимента. В абсорбционной томографии можно использовать белый, фильтрованный, “розовый” и монохроматические пучки, в осевой фазоконтрастной томографии – “розовый” и монохроматические пучки, в рефракционной – только монохроматический пучок.

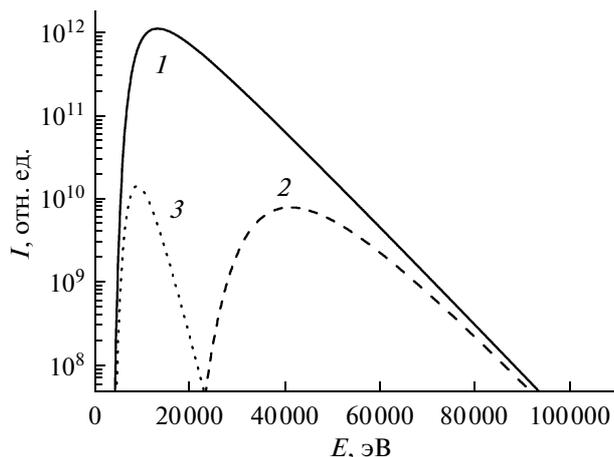


Рис. 1. Расчетные спектры излучения пучка из окон накопителя (1), пучка после медного фильтра толщиной 2 мм (2) и “розового” пучка (3).

Пучок синхротронного излучения имеет большую высоту (около 2 мм), и, соответственно, для изучения крупных объектов нужно сканирование, за исключением использования рефракционной схемы с асимметричным кристаллом, где высота поля зрения возрастает пропорционально степени асимметрии и составляет 3–5 см. Для регистрации экспериментальных данных, т.е. проекций, используются двухкоординатные детекторы на базе поликристаллических (CsI) и монокристаллических ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) сцинтилляторов и ПЗС-камер размерностью 1024×1024 элемента, пространственное разрешение варьируется от 2 до 10 мкм. Как правило, съемка заключалась в регистрации 360 проекций, пустого пучка и темного тока детектора. Первичная обработка проекций (очистка от шума, учет фона и неоднородностей пучка, нормировка) проводилась с помощью макросов программы ImageJ [2], восстановление срезов по проекциям выполнялось методом свертки и обратного проектирования с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье и стандартного радиального фильтра [3].

ТОМОГРАФИЯ В БЕЛОМ ПУЧКЕ

Самым простым способом съемки является использование белого пучка. В этом случае экспериментальная схема состоит из щелей, фильтров, устройства позиционирования образца и детектора. Использование белого пучка может быть целесообразным только для просвечивания сравнительно толстых объектов, при этом мягкая часть спектра не используется и может быть отсечена поглощающим фильтром. Недостатком метода является трудность достижения высокого пространственного разрешения, так как область свечения монокристаллического сцинтиллятора

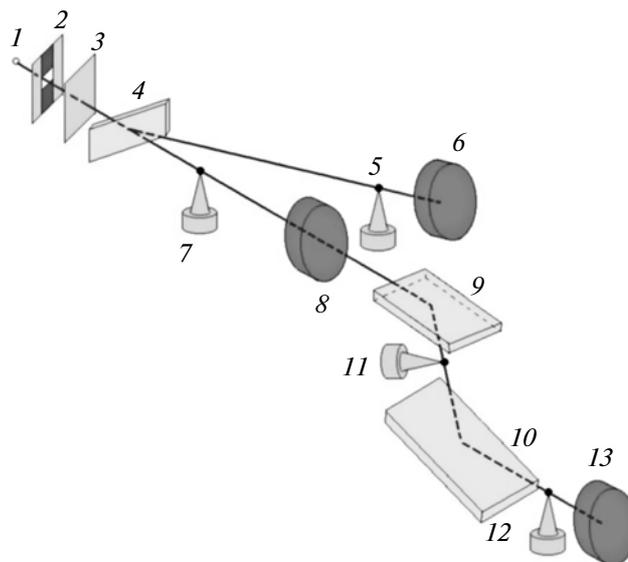


Рис. 2. Схема установки: 1 – источник СИ; 2 – щели; 3 – фильтры. При работе с монохроматическим пучком: 4 – кристалл; 5 – образец; 6 – детектор. При работе с белым и “розовым” пучком: 7 – образец; 8 – детектор. При работе с рефракционным контрастом: 9, 10 – кристаллы; 11, 12 – возможные положения образца; 13 – детектор.

при больших энергиях возрастает, а разрешение поликристаллического сцинтиллятора ограничено размером зерна.

В качестве примера такого исследования представлены результаты исследования строения аккумуляторов, используемых в компьютерах-ноутбуках. Съемка проводилась в прямом пучке синхротронного излучения с использованием набора фильтров (Al, Cu) для ослабления пучка и отсекания низкоэнергетической части спектра (рис. 1, кривая 2). Съемка проводилась с пространственным разрешением 20 мкм. Один из восстановленных срезов приведен на рис. 3. Хорошо видна спиральная структура аккумулятора, состоящая из слоев электродов и электролита. Возможен контроль состояния аккумулятора по таким параметрам, как равномерность структуры, отсутствие инородных включений и так далее.

ТОМОГРАФИЯ В МОНОХРОМАТИЧЕСКОМ ПУЧКЕ

“Классическим” методом томографической съемки в синхротронном излучении является съемка с монохроматором, причем, как правило, используются двухкристальные монохроматоры. При очевидных преимуществах этих устройств, они проигрывают в гибкости выбора условий эксперимента. Поэтому для томографии на станции “Медиана” была выбрана схема с однокристалль-

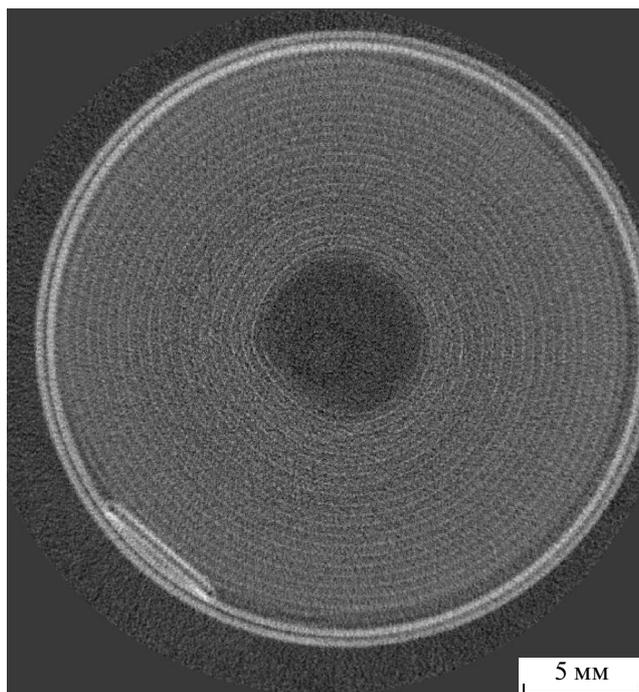


Рис. 3. Аксиальный срез объемного изображения аккумулятора.

ным монохроматором, отражающим в горизонтальной плоскости. Недостатком такой схемы является повышенный фон, но он может быть учтен при обработке проекций. Важным моментом является выбор кристалла-монохроматора.

В качестве монохроматоров для СИ наиболее часто используют кристаллы высокосоввершенного кремния, однако известно, что он имеет малую отражательную способность. С другой стороны, совершенство кристалла необходимо для сохранения высокого пространственного разрешения. Исходя из этого, как близкий к оптимальному был выбран кристалл германия с механически шлифованной поверхностью, дающий равномерное без

значительных дефектов поле зрения и интенсивность, примерно в четыре раза превышающую таковую для совершенного кремния. Наилучшее пространственное разрешение, которого удалось добиться при энергии излучения $E = 12$ кэВ, составляло 3 мкм, при $E = 17$ кэВ оно ухудшалось до 5 мкм.

В качестве примера томографии в монохроматическом пучке представлены результаты исследования природного кристалла алмаза. Исследовался кристалл размером около 2 мм с включениями, форма и распределение которых представляли интерес. Пространственное разрешение составляло 10 мкм, время экспозиции на одну проекцию – 5 с. На рис. 4 представлены один из реконструированных срезов и произвольная проекция трехмерной модели кристалла, построенной по массиву срезов после применения функции выделения краев.

ТОМОГРАФИЯ В “РОЗОВОМ” ПУЧКЕ

При исследовании тонких слабопоглощающих объектов (как правило, это биологические объекты), достаточно иметь пучок с энергией около 10 кэВ, при этом требования к монохроматичности невысоки, и оптимально использование “розового” пучка. Это, наряду со съемкой в белом пучке, является наиболее экспрессным экспериментом, время экспозиции при разрешении 2 мкм составляло 200 мс, общее время съемки в нашем случае лимитировалось скоростью считывания детектора. При расстоянии от объекта до детектора 10–100 см наблюдается фазовый контраст в виде выделенных контуров объекта [4].

Таким способом было получено трехмерное изображение головы обыкновенного комара (рис. 5). На изображениях и на восстановленных проекциях хорошо видны как внешние детали (например, усики), так и детали внутреннего строения объекта.

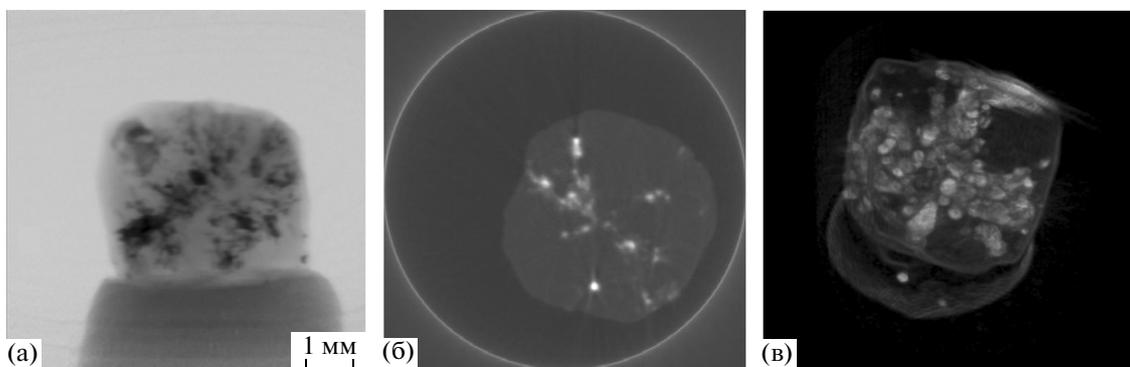


Рис. 4. Томографическое восстановление строения кристалла алмаза с включениями: а – одна из исходных проекций; б – одно из восстановленных сечений; в – произвольная проекция трехмерного изображения.

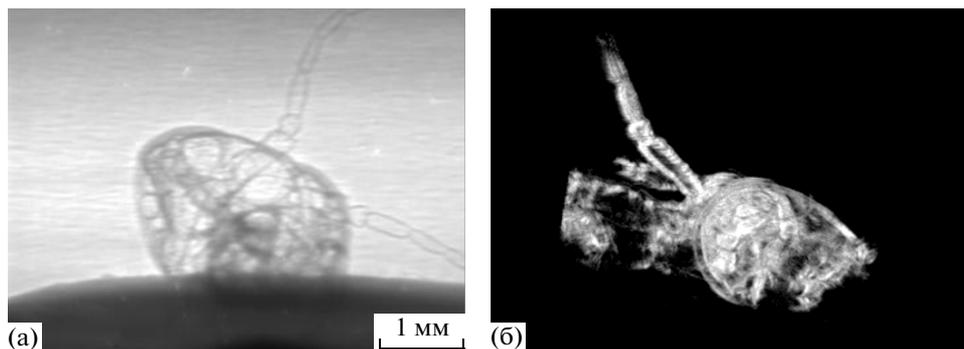


Рис. 5. Томографическое восстановление головы комара: а — одна из исходных проекций; б — произвольная проекция трехмерного изображения.

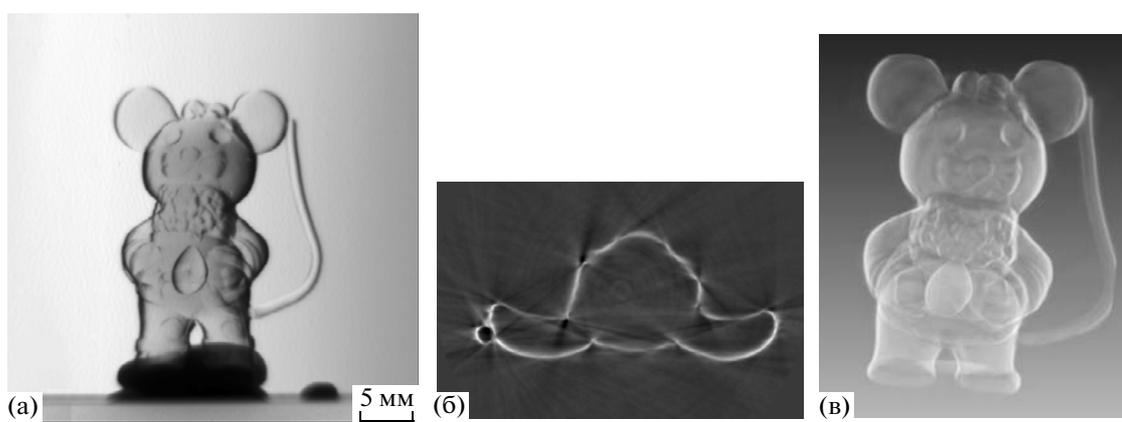


Рис. 6. Томографическое восстановление фигурки мыши: а — одна из проекций; б — одно из томографических сечений; в — произвольная проекция трехмерного изображения.

ТОМОГРАФИЯ С РЕФРАКЦИОННЫМ КОНТРАСТОМ

Наиболее высокого усиления контраста при исследовании слабопоглощающих объектов либо объектов, компоненты которых характеризуются малой разницей плотностей, можно достичь с применением метода рефракционной интроскопии [5]. Основной экспериментальной трудностью метода является длительное (несколько часов) удержание кристаллов в отражающем положении при узкой (около 0.5 угл. с) кривой качания. Эта проблема решалась с помощью активной стабилизации интенсивности при помощи системы с обратной связью, состоящей из видеокамеры, регистрирующей пучок на люминофорном экране, и пьезопривода, постоянно поддерживающего кристаллы в максимуме отражения.

Для демонстрационного эксперимента в качестве объекта была взята пластиковая фигурка мыши высотой 2 см. На проекциях на краях изображения мыши наблюдается сильный рефракционный контраст, который также приводит к сильному оконтуриванию изображения на восстановленных срезах (рис. 6). В нашем случае

можно говорить об избыточности такого контраста, что приводит к появлению артефактов восстановления. Однако можно ожидать, что при разности показателей преломления на порядок меньше томографическая съемка с рефракционным контрастом должна привести к качественному росту чувствительности при обнаружении малых вариаций плотности в объекте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализованный на станции “Медиана” Курчатовского источника СИ комплекс неразрушающих методов получения трехмерных изображений внутреннего строения объектов с использованием томографии позволяет в широких пределах варьировать условия съемки, оптимизируя параметры экспериментальной схемы с учетом особенностей изучаемого объекта. Представленные в статье результаты позволяют сделать вывод о перспективности дальнейшего развития этих методов.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП “Курчатовский центр синхротронного излучения и нанотехнологий” в рамках госу-

дарственного контракта №16.552.11.7003 и под-
держана РФФИ (гранты № 11-02-12155-офи-м-
2011, № 10-02-00047а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Manushkin A.A., Pogoreliy D.K., Podurets K.M. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2007. V. 575. P. 225.
2. *Rasband W.S.* ImageJ. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <http://imagej.nih.gov/ij/> 1997–2011.
3. *Herman G.T.* Fundamentals of Computerized Tomography: Image Reconstruction from Projections. New York-London: Acad. Press, 1980. 316 p.
4. *Pogoreliy D.K., Podurets K.M., Pavlova N.S.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2009. V. 603 P. 167.
5. *Подурец К.М., Соменков В.А., Шильштейн С.Ш.* // ЖТФ. 1989. Т. 58. № 6. С. 115.

Multimode X-Ray Tomography on the “Mediana” Station of the Kurchatov Source of Synchrotron Radiation

K. M. Podurets, D. K. Pogoreliy, A. A. Kaloyan, E. S. Kovalenko, V. G. Kohn

A usage of synchrotron radiation in the X-ray tomography allows one to vary the conditions of registration in wide limits owing to continuous spectrum, high brightness and collimation of the beam. The possibilities of multimode X-ray tomography on the “Mediana” station of the Kurchatov source of synchrotron radiation are described. They include the tomography and the microtomography using the white and “pink” beams, registration using the monochromatic beam, as well as registration with a usage of axial and refractive phase contrast methods. The results are obtained in various conditions of registration for different objects.