

УДК 539.21, 535.317.61-34, 548.732

ПРЕЛОМЛЯЮЩАЯ РЕНТГЕНОВСКАЯ ОПТИКА ДЛЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Дудчик Ю.И.

НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрена возможность получения рентгеновских микропучков с использованием короткофокусной многоэлементной преломляющей рентгеновской линзы. Линза с фокусным расстоянием f располагается на расстоянии $a > 2f$ от фокусного пятна рентгеновской трубки и формирует уменьшенное изображение источника излучения. Применение микрофокусных источников рентгеновского излучения позволяет получать рентгеновские пучки микронных размеров, что важно для рентгеновского микроанализа.
Ключевые слова: рентгеновские лучи, многоэлементная преломляющая рентгеновская линза.

REFRACTIVE X-RAY OPTICS FOR LABORATORY SOURCES

Dudchik Y.

A.N. Sevchenko Scientific-Research Institute of Applied Physics Problems BSU
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The possibility of X-ray microbeams formation using a short-focus multi-element refractive X-ray lens is considered. A lens with focal length f is located at a distance $a > 2f$ from the focal spot of the X-ray tube and forms a reduced image of the radiation source. The use of microfocus X-ray sources makes it possible to obtain micron-sized X-ray beams, which is important for X-ray microanalysis.

Key words: X-rays, focus multi-element refractive X-ray lens.

Известно, что эффект преломления рентгеновских лучей в среде мал, и поэтому в течение почти 100 лет считалось, что преломляющая оптика для рентгеновского диапазона спектра не эффективна. Бурное развитие ускорительной техники и появление синхротронных источников рентгеновского излучения, число которых в мире сейчас более 50, стимулировало развитие преломляющей рентгеновской оптики. Поскольку поперечный размер рентгеновского пучка от синхротронного источника составляет около 100 мкм, то перспективными оказались многоэлементные преломляющие рентгеновские линзы, которые были предложены в 1996 г. [1]. Многоэлементная рентгеновская линза состоит из большого числа (30 и более) двояковогнутых соосно расположенных микролинз, выполненных из материала, слабо поглощающего рентгеновское излучение, например, бериллия, углерода, алюминия или полимера. Радиус кривизны отдельной микролинзы составляет 50–200 мкм. Первая преломляющая линза, описанная в [1], была одномерной и выполнена в виде алюминиевой пластины, в которой было просверлено 30 отверстий диаметром 0,6 мм. Диаметры отверстий располагались на одной линии-оптической оси линзы, алюминиевые перешейки между отверстиями представляли собой сферические одномерные двояковогнутые линзы. Фокусное расстояние данной линзы составляло 1,8 м для фотонов с энергией 14 кэВ. В настоящее время многоэлементные преломляющие рентгеновские линзы широко используются для фокусировки рентгеновских лучей с энергией от 5 кэВ до

80 кэВ от синхротронов в пятна микронных и субмикронных размеров. В идеале такие линзы делаются из бериллия, имеют параболическую форму с радиусом кривизны около 50 мкм, число линз от 20 до 100, фокусное расстояние 0,5–1 м. Большое фокусное расстояние линзы не позволяет использовать ее для лабораторных источников излучения в виде рентгеновских трубок. Поэтому разработка короткофокусных рентгеновских линз и их использование для случая лабораторных источников излучения является актуальной проблемой.

В НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ разработаны короткофокусные многоэлементные преломляющие линзы для рентгеновских лучей с фокусным расстоянием 40–100 мм для фотонов с энергией 8 кэВ, и исследованы их рентгенооптические характеристики. Линза состоит из большого числа (100–300) двояковогнутых эпоксидных микролинз, которые сформированы в стеклянном капилляре: радиус кривизны отдельной микролинзы совпадает с радиусом канала капилляра и может быть выбран из интервала от 10 до 400 мкм. Линза тестировалась на различных синхротронах, и было показано их эффективность фокусировать рентгеновское излучение в пятно микронных размеров.

Как и линза для видимого излучения, преломляющая линза для рентгеновских лучей является изображающим устройством и может быть использована в качестве объектива для формирования микропучков. Если источник излучения имеет размер S и расположен на расстоянии a от линзы, то положение изображения источника b

относительно линзы и его размер S_1 находятся из следующих соотношений:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}, \quad (1)$$

$$S_1 = S \frac{f}{a - f}. \quad (2)$$

Если $a > 2f$, то линза формирует уменьшенное изображение источника.

Для формирования рентгеновского пучка использовалась многоэлементная преломляющая рентгеновская линза, содержащая 161 двояковогнутую эпоксидную микролинзу с радиусом кривизны 50 мкм каждая, длина линзы – 18 мм. Фокусное расстояние линзы для фотонов с энергией 8 кэВ – 41 мм. В качестве источника излучения использовалась рентгеновская трубка БСВ-17 с медным анодом. Рабочее напряжение на аноде трубки – 32 кВ, анодный ток – 14 мА. Энергия фотонов характеристического излучения меди равна 8 кэВ. Фокусное пятно трубки имеет размер 0,6×0,8 мм². На рисунке 1 показана система для фокусировки рентгеновского пучка и измерения его размеров.

В качестве рентгеновской камеры для регистрации изображения лучей была использована камера фирмы Photonic Science (модель FDI VHR). Камера состоит из блока детектирования, компьютера с платой видео захвата и программным обеспечением для захвата и обработки изображения. Блок детектирования содержит ПЗС – матрицу, к которой присоединена волоконно-оптическая шайба с нанесенным сцинтиллятором. Размер рабочей области рентгеновской камеры составляет 18×12 мм², число пикселей равно 4008×2670. Размер одного пикселя на входе камеры равен 4,5 мкм. Для обработки изображений использовалось программное обеспечение, поставляемое вместе с камерой, а также приложение ImageJ.

Полученные изображения были проанализированы с использованием программы ImageJ: их размеры оказались уменьшенными в 4 и 6 раз относительно размера источника излучения (0,6×0,8 мм²), что соответствует расчетам по формуле линзы (1). Значительное уменьшение размеров пучка в фокусе линзы, вплоть до нескольких микрометров достигается путем использования мощных микрофокусных рентгеновских трубок, которые имеют размер фокусного пятна 20–50 мкм, как это показано в [2].

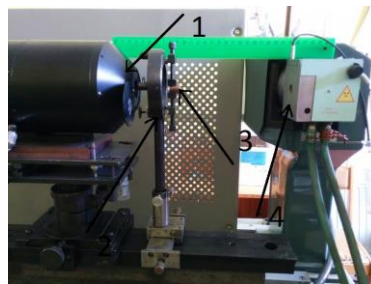


Рисунок 1 – Система для фокусировки рентгеновского пучка: 1 – рентгеновская 2D камера; 2 – гониометр для линзы; 3 – линза в держателе; 4 – рентгеновская трубка

Для получения уменьшенного в N раз ($N = 4$ и $N = 6$) изображения источника рентгеновская линза располагалась на расстояниях $a_1 = 200$ мм и $a_2 = 290$ мм от рентгеновской трубки, расстояния до плоскости изображения линзы, где располагался блок детектирования, b_1 и b_2 рассчитывались по формуле (1) и равнялись: $b_1 = 50$ мм, $b_2 = 48$ мм. Полученные с использованием рентгеновской линзы изображения источника излучения показаны на рисунке 2.

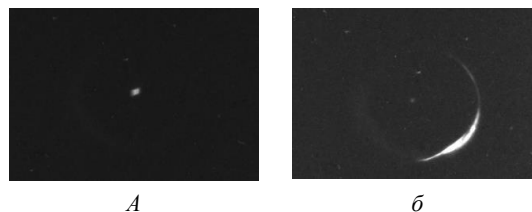


Рисунок 2 – Уменьшенные в N раз изображения источника, полученные с помощью рентгеновской линзы: а) – $a_1 = 200$ мм, $b_1 = 50$ мм, $N = 4$, экспозиция 1,5 с; б) – $a_2 = 290$ мм, $b_2 = 48$ мм, $N = 6$, экспозиция 5 с

Работа частично поддержана Министерством образования Республики Беларусь в рамках задания 3.07 ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении», подпрограмма «Техническая диагностика».

Литература

1. A compound refractive lens for focusing high-energy X-rays / A. Snigirev [et al.] // Nature. – 1996. – Vol. 384. – P. 49–51.
2. Формирование рентгеновских микро-пучков с использованием короткофокусной преломляющей рентгеновской линзы и лабораторного источника излучения / Ю.И. Дудчик [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2016. – Т. 10. – С. 1–6.