

ФОКУСИРОВКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ПРЕЛОМЛЯЮЩИХ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛИНЗ

Приведены результаты исследований по фокусировке рентгеновских лучей на синхротроне PAL (Республика Корея) с использованием рентгеновской оптики, разработанной в НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ.

В настоящее время в мире существует более 40 центров синхротронного излучения, включая и так называемые синхротроны третьего поколения (ESRF (Франция), APS (США), SPring-8 (Япония) и др.), которые позволяют получать интенсивные рентгеновские пучки с поперечным размером около 100 мкм и энергией фотонов 5-20 кэВ. Такие пучки могут быть сфокусированы в пятна микронных размеров с использованием целого ряда оптических элементов, одним из которых является многоэлементная преломляющая рентгеновская линза.

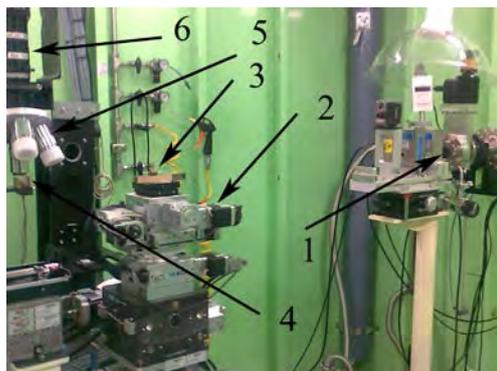
Источник синхротронного излучения третьего поколения в Республике Корея PAL (Pohang Accelerator Laboratory) введен в эксплуатацию в мае 2012 г. в результате модернизации ранее существовавшего синхротрона второго поколения. В результате модернизации был значительно увеличен ток электронов в накопительном пучке, уменьшено поперечное сечение электронного пучка до величины в 100-200 мкм.

В НИИПФП им. А.Н.Севченко БГУ разработаны многоэлементные преломляющие линзы для рентгеновских лучей с относительно коротким фокусным расстоянием [1-3]. Линза выполнена в виде стеклянного капилляра, заполненного большим числом (100-300) двояковогнутых оксидных микролинз. Радиус кривизны отдельной микролинзы совпадает с радиусом канала капилляра и, благодаря этому, становится возможным создать линзы с радиусом кривизны поверхности, равным 10-50 мкм, что трудно реализовать другими известными методами.

Преломляющая рентгеновская линза, как и линза для видимого излучения, позволяет получать уменьшенное изображение источника излучения. Эта особенность линзы используется для получения микро- и нано- пучков от синхротронных источников. Для этих источников, как правило, область пространства, в которой формируется рентгеновский пучок, удалена от объекта исследования на расстояние 10-50 м, что значительно превышает фокусное расстояние линзы. Например, на станции 6D X-ray microscopy синхротрона PAL это расстояние равно 31,4 м. Размер фокусного пятна S_f рентгеновской линзы можно определить, пользуясь следующими, хорошо известными из оптики, формулами линзы: $1/a + 1/b = 1/f$, $S_f = Sf/(a-b)$, где a - расстояние от источника излучения до линзы, b - расстояние от линзы до плоскости изображения, S - размер источника излучения, f - фокусное расстояние линзы. Фокусное расстояние f рентгеновской линзы определяется как: $f = R/(2\delta N)$, где R - радиус кривизны линзы, $(1-\delta)$ - действительная часть комплексного показателя преломления материала линзы. Если источник излучения удален достаточно далеко от линзы, то размер изображения источника приближается к размеру дифракционного пятна, радиус которого $R_{dif} = 0,61\lambda f / R_a$, где R_a - апертура линзы, λ - длина волны.

Для экспериментов на синхротроне PAL были разработаны и изготовлены три линзы для рентгеновских лучей. Линза №1 состоит из 81 двояковогнутых микролинз, с радиусом кривизны поверхности 250 мкм. Рассчитанное фокусное расстояние линзы для фотонов с энергией 8 кэВ равно 408 мм. Линза №2 состоит из 134 микролинз. Радиус кривизны отдельной линзы равен 100 микрон. Рассчитанное фокусное расстояние линзы для фотонов с энергией 8 кэВ равно 98 мм. Линза №3 состоит из 126 микролинз. Радиус кривизны поверхности отдельной линзы равен 50 микрон. Рассчитанное фокусное расстояние линзы для фотонов с энергией 8 кэВ равно 52,5 мм.

На рисунке 1 показана фотография экспериментальной установки, на которой проводились исследования.



1- система вывода синхротронного излучения, 2- гониометр, 3- многоэлементная преломляющая рентгеновская линза в держателе, 4- кристалл сцинтиллятора, 5- объектив микроскопа, 6- CCD-камера

Рисунок 1 – Установка для определения параметров рентгеновской линзы

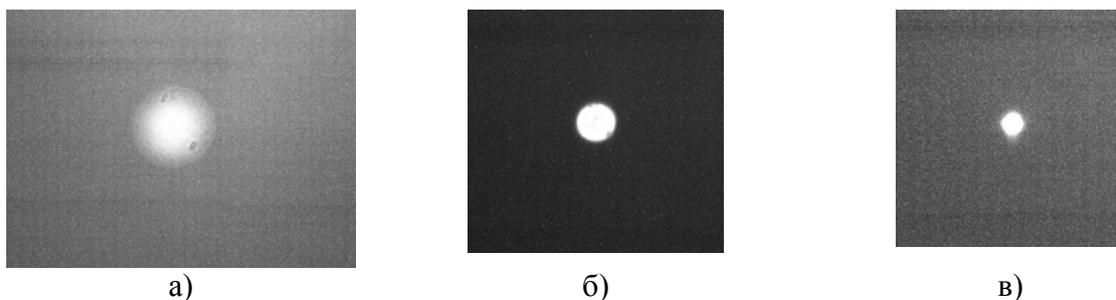
Рентгеновские лучи от синхротронного источника излучения монохроматизировались с помощью двухкристального монохроматора и направлялись через линзу на сцинтиллятор. Энергия фотонов была выбрана равной 8 кэВ. Излучение от сцинтиллятора через объектив направлялось на цифровую рентгеновскую камеру. Рентгеновская камера представляет собой цифровую 12-битовую CCD-камеру формата 1376 X 1040 пикселей. Перед камерой установлена пластинка из сцинтиллятора и оптический объектив для передачи изображения со сцинтиллятора на камеру. В качестве сцинтиллятора использована пластина CdWO_4 фирмы MTI Corporation.

Размер синхротронного источника излучения равен 148 мкм x 71 мкм. Линза располагается на расстоянии 31,4 м от источника. Камера может располагаться на заданном расстоянии от линзы. На рисунке 2 показано изображение поперечного сечения пучка рентгеновского излучения прошедшего через линзу №1 на различных расстояниях от камеры.

Из рисунка видно, что наименьшее поперечное сечение пучка получается при размещении камеры на расстоянии 41 см до линзы. Это расстояние с хорошей степенью точности совпадает с рассчитанным фокусным расстоянием линзы №1, равным 408 мм. С целью уточнения этого результата было проведено сканирование пучка с шагом 5 мм в диапазоне расстояний от 38 см до 41 см. Экспозиция при фотографировании составляла 5 с. Изображение, полученное на фотографиях, обрабатывалось с помощью программного пакета ImageJ. В результате этой обработки определялся размер пучка. Минимальный размер пучка был получен на расстоянии 40,5 см. Это расстояние принималось за фокусное расстояние. Было установлено, что размер пучка в горизонтальном измерении составляет 4,5 мкм, а в вертикальном- 5,5 мкм. Более точно установить размер пучка не представляется возможным, поскольку пространственная разрешающая способность данного метода составляет 2-3 мкм. Это связано с тем, что в экспериментах использовалась пластина сцинтиллятора толщиной 150 мкм.

Линза №3 с фокусным расстоянием 52,5 мм использовалась в качестве объектива рентгеновского микроскопа, который был реализован на синхротроне PAL. В качестве объекта использовалась золотая сетка № 1500 с числом ячеек на один дюйм равным 1500, толщина проволоки составляет 6 мкм. Объект располагался на удвоенном фокусном расстоянии до линзы, на таком же расстоянии до линзы располагался и кристалл сцинтиллятора, что позволило получать изображение объекта в соотношении 1:1.

На рисунке 3 показано изображение сетки № 1500, полученное на синхротроне PAL с использованием указанной выше линзы №3 при увеличении $M=1$. Источник рентгеновского излучения находился на расстоянии 31,4 м до линзы.



а) расстояние линза- камера равно 20 см; б) расстояние линза- камера равно 30 см; в) расстояние линза- камера равно 41 см
 Рисунок 2- Изображение поперечного сечения рентгеновского пучка с энергией фотонов 8 кэВ, прошедшего через линзу №1, на различных расстояниях до камеры.

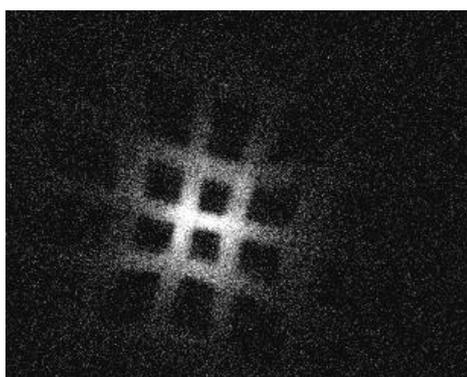


Рисунок 3 - Изображение сетки № 1500 в рентгеновских лучах, полученное на синхротроне PAL с использованием рентгеновской линзы №3; увеличение $M=1$

Проведенный анализ изображения сетки №1500 показал, что разрешение микроскопа составляет около 2-3 мкм, поэтому линзы, разработанные в НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ перспективны для формирования микропучков рентгеновского излучения.

Список литературы

1. Dudchik, Yury. Design and Application of X-Ray Lens in the Form of Glass Capillary Filled by a Set of Concave Epoxy Microlenses // Optical Fiber Communications and Devices. Edited by: Moh. Yasin, Sulaiman W. Harun and Hamzah Arof (Ed.), ISBN: 978-953-307-954-7, Publisher:InTech, February 2012.- P.77 - 94.
2. Using of a microcapillary refractive X-ray lens for focusing and imaging / Yu.I. Dudchik, F.F. Komarov, M.A. Piestrup, C.K. Gary, H. Park, J.T. Cremer // Spectrochimica Acta, 62B, (2007), P. 598 – 602.
3. Дудчик, Ю.И. Многоэлементная сферическая преломляющая линза для формирования микро- и наноразмерных пучков рентгеновского излучения. // Вест. Белорус. гос. ун-та. Сер. 1. – 2008.– №2– С. 26 – 30.

Results of experiments on X-ray focusing at PAL synchrotron source are presented. X-rays were focused by the lenses designed in the A.N. Sevchenko Institute of Applied Physics Problems of BSU.

Дудчик Ю.И., заместитель директора по научной работе НИИПФП им. А.Н.Севченко БГУ, Минск, Беларусь, e-mail: dudchik@bsu.by

Д-р Джэи-Хонг Лим, начальник станции 6D на синхротроне PAL, Поханг, Республика Корея, e-mail: limjh@postech.ac.kr