

ФОКУСИРОВКА РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОРОТКОФОКУСНОЙ ПРЕЛОМЛЯЮЩЕЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ЛИНЗЫ

¹Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем
имени А.Н.Севченко» Белорусского государственного университета.

Минск, Республика Беларусь. dudchik@bsu.by

²Балтийский федеральный университет имени Канта.

Калининград, Российская Федерация. dserebrennikov@innopark.kantiana.ru

Показана возможность формирования рентгеновского микропучка от лабораторного источника излучения короткофокусной многоэлементной преломляющей рентгеновской линзой. Линза состоит из 161 двояковогнутой сферической эпоксидной микролинзы с радиусом кривизны 50 мкм каждая. В качестве источника излучения использовалась микрофокусная рентгеновская трубка «Metal Jet» (Excillum™) с размером фокусного пятна 20 мкм и жидким галлиевым анодом. Измеренное значение фокусного пятна в плоскости изображения линзы составляет 2.4 мкм, что соответствует теоретическим оценкам.

Реализация целого ряда исследовательских методик, таких, как, микроанализ, микроскопия и дифрактометрия высокого разрешения, микроскопия стоячих волн и т.д., стала возможна благодаря появлению высокомоощных источников синхротронного излучения. Поскольку синхротронные источники являются уникальными, дорогостоящими, и постоянно загруженными работой, то, по-прежнему, стоит вопрос о получении микро и нано-размерных пучков с похожими свойствами в лабораторных условиях. Основным необходимым требованием к излучению, получаемому на лабораторном источнике, является высокая плотность потока фотонов, зависящая как от яркости и свойств самого источника излучения, так и от эффективности рентгенооптической системы.

В работе в качестве источника рентгеновских лучей использовалась микрофокусная рентгеновская трубка «Metal Jet» (Excillum™) со следующим параметрами: размер фокусного пятна – 20×20 мкм², рабочее напряжение 30 кВ, ток - 2.87 мА. В качестве материала анода использован жидкий галлий, энергия характеристических фотонов K_{α} серии галлия составляет 9.25 кэВ. В качестве оптического элемента для формирования рентгеновского пучка использовалась многоэлементная преломляющая рентгеновская линза, разработанная в НИИ-ИПФП им. А.Н. Севченко БГУ [1]. Линза выполнена в виде стеклянного капилляра, заполненного 161 двояковогнутой сферической эпоксидной микролинзой с радиусом кривизны поверхности равным 50 мкм.

Принципы работы преломляющей рентгеновской линзы схожи с оптикой видимого света - рентгеновская линза позволяет получать изображения как источников излучения, так и объектов на пути прохождения излучения. Так, если источник излучения имеет размер S и расположен на расстоянии a от линзы, то положение изображения источника относительно линзы и его размер S_1 находятся из следующих соотношений:

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

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

где b - расстояние от линзы до плоскости изображения, f - фокусное расстояние рентгеновской линзы, которое рассчитывается по следующей формуле:

$$f = \frac{R}{2N\delta} \quad (3)$$

где, N – число микролинз, R – радиус кривизны линзы, а δ – декремент показателя преломления вещества n , который пропорционален квадрату длины волны падающего излучения λ . В частности, из соотношения (1), которое является формулой тонкой линзы, следует, что если расположить источник излучения на расстоянии $a > 2f$, то изображение источника будет уменьшенным.

Исследования по формированию микроразмерного рентгеновского пучка проводились в лаборатории рентгеновской оптики НОЦ «Функциональные Наноматериалы» БФУ им. И. Канта. Для исследований был изготовлен рентгенооптический стенд, показанный на рисунке 1. Стенд содержит микрофокусный рентгеновский источник - 1, рентгеновскую линзу в держателе – 2, высокочувствительную рентгеновскую камеру - 3, систему сканирования рентгеновского пучка – 4, управляемый компьютером моторизованный гониометр – 5.

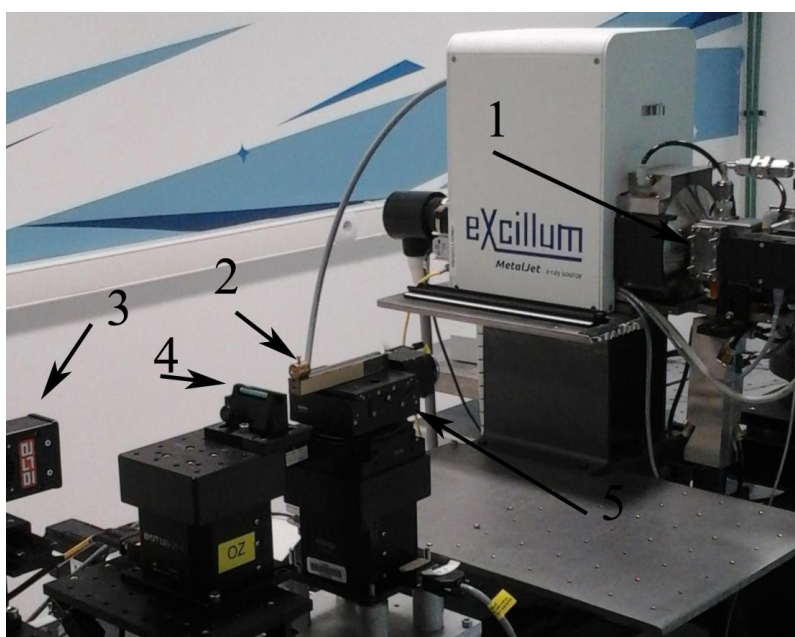


Рисунок 1 – Фотография рентгенооптического стенда для исследования параметров рентгеновского пучка.

Для формирования рентгеновского микро-пучка рентгеновская линза располагалась на расстоянии $a = 715$ мм от источника, как это показано на рисунке 2. Расчетное фокусное расстояние линзы f для фотонов с энергией 9.25 кэВ составило $f = 54.9$ мм. Положение плоскости изображений линзы ($b = 59.5$ мм) рассчитывалось по формуле (1). На этом расстоянии от линзы располагалась рентгеновская камера. В соответствии с данной геометрией можно ожидать, что в плоскости изображений будет наблюдаться уменьшенное в $b/a = 12$ раз изображение источника излучения.

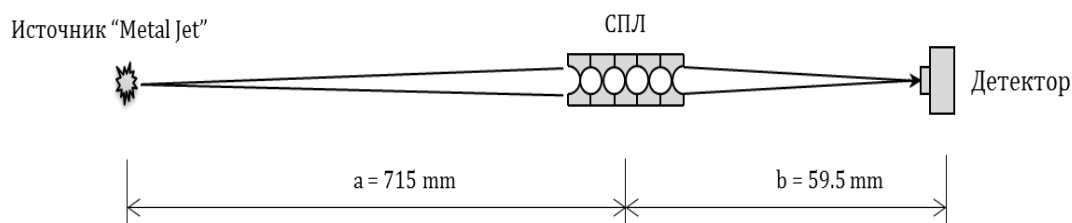


Рисунок 2 – Схема эксперимента.

Для определения размеров рентгеновского пучка был выбран метод ножевой диафрагмы, где в качестве «ножа» был использован вольфрамовый цилиндр, размещенный на моторизованном держателе. Интенсивность регистрировалась высокочувствительной камерой Timerix STPX-65k (Amsterdam Scientific Instruments™) с матрицей MediPix и размером пикселя 55 мкм. Контролируемые значения интенсивности излучения определялись по пикселю, на котором была локализована фокусировка. «Нож» располагался в плоскости изображения линзы, как показано на рисунке 2.

На рисунке 3 показана кривая зависимости измеренной интенсивности излучения от положения «ножа», а также - результат дифференцирования этой кривой. Полная ширина на полувысоте графика производной оказалась равна 2.4 мкм, что соответствует измеренному вертикальному размеру сфокусированного излучения. Учитывая, что размер источника излучения составлял 20 мкм, то ожидаемое значение изображения источника, рассчитанное в соответствии с формулами 1, 2 составило 1.7 мкм. Поскольку погрешность в определении положения «ножа» равняется ~ 1 мкм, можно сказать, что измеренный размер изображения источника, равный 2.4 мкм, с хорошей степенью точности совпал с ожидаемым значением 1.7 мкм.

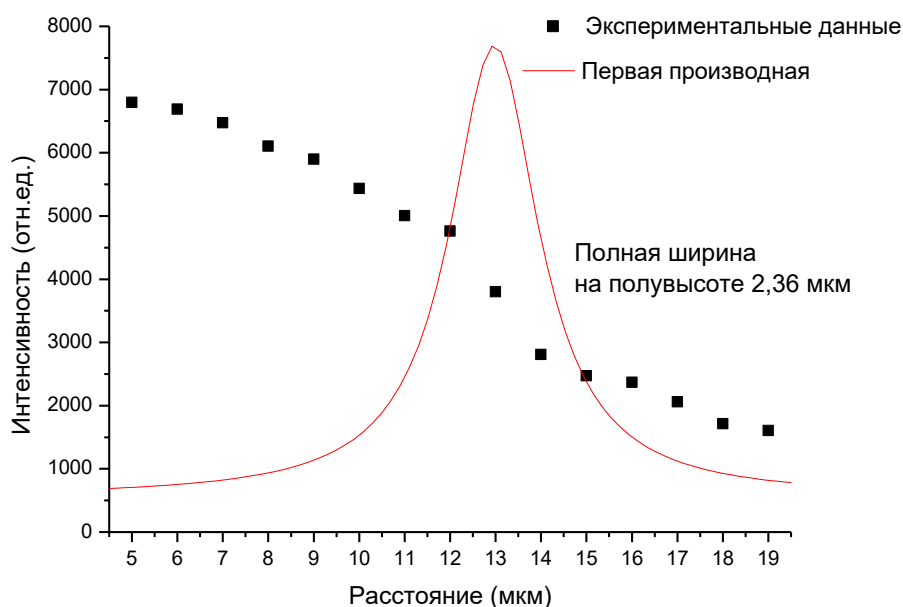


Рисунок 3 – Зависимость интенсивности рентгеновского излучения в фокусе от положения «ножа» и ее производная.

Таким образом, впервые с использованием многоэлементных преломляющих рентгеновских линз осуществлена фокусировка рентгеновского излучения в пятно микронных размеров.

Данная работа поддержана Министерством Образования РФ, а также российско-белорусским грантом БРФФИ и РФФИ (проект Ф16Р-070, проекты №.14.Y26.31.0002 and 16-52-00212).

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.