

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ИСТОЧНИКОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ ПРЕЛОМЛЯЮЩЕЙ  
РЕНТГЕНОВСКОЙ ЛИНЗЫ**

*Дудчик Ю.И.*

Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь

*С использованием многоэлементной преломляющей рентгеновской линзы определены размеры двух источников рентгеновского излучения: синхротронного источника излучения на канале 2–3 в Стэнфордской лаборатории синхротронного излучения и микрофокусной рентгеновской трубки с медным анодом. Рентгеновский пучок от источника излучения фокусировался рентгеновской линзой и определялись параметры пучка в плоскости изображения линзы. Размер рентгеновского пучка определялся методом сканирования с помощью диафрагмы и методом визуализации пучка с использованием цифровой рентгеновской камеры. Установлено, что размер синхротронного источника излучения в вертикальном направлении равен 0,6 мм, а размер фокусного пятна рентгеновской трубки – 60 мкм. (E-mail: dudchik@bsu.by)*

**Ключевые слова:** рентгеновские лучи, синхротронное излучение, рентгеновская трубка, многоэлементная преломляющая рентгеновская линза.

**Введение**

Рентгеновское излучение широко используется в различных областях науки и техники: в материаловедении, биологии, медицине, технической диагностике. Основными источниками рентгеновских лучей в настоящее время являются рентгеновская трубка и синхротронный источник излучения. Рентгеновские трубки различаются по назначению, мощности, размеру фокусного пятна. Фокусное пятно рентгеновской трубки – это область анода, которая бомбардируется электронами и излучает рентгеновские фотоны. Например, размер фокусного пятна рентгеновских трубок для просвечивания составляет от 1 до 100 мкм. Он измеряется при заводских испытаниях трубки, а для трубок медицинского назначения – и в процессе эксплуатации. Существует несколько методов измерения фокусного пятна рентгеновской трубки: путем фотографирования специального тест-объекта в виде сетки, метод «ножа», с использованием элементов поликапиллярной оптики, фотографирование фокусного пятна при помощи камеры-обскура с небольшим отверстием [1]. Последний метод приобрел особую

популярность в связи с появлением цифровых рентгеновских камер, которые постепенно заменяют широко используемую в рентгеновской технике фотопленку. Разрешающая способность указанного метода ограничена размером отверстия камеры, которое в силу ряда причин не может быть меньше чем 5–6 мкм. Поэтому существует определенная проблема в измерении фокусного пятна микрофокусных рентгеновских трубок с разрешением лучше чем 5 мкм. Очевидным решением проблемы могла бы быть замена отверстия в камере-обскуре на преломляющую линзу, однако в течение фактически 100 лет после открытия рентгеновских лучей считалось, что преломляющая оптика для рентгеновского диапазона спектра неэффективна в силу малости показателя преломления. И только в 1996 г. группа исследователей предложила многоэлементную преломляющую рентгеновскую линзу [2], которая состоит из большого количества (50–300) соосно расположенных двояковогнутых микролинз, изготовленных из материала с небольшим порядковым номером, например алюминия, бериллия, или полимера. Как показали расчеты и проведенные исследования, такая система эф-

фективно преломляет рентгеновские лучи и может быть использована как фокусирующее и изображающее устройство для рентгеновских лучей с энергией фотонов от 5 до 30 кэВ.

Что касается синхротронных источников излучения, то они представляют собой уникальные и дорогостоящие центры коллективного пользования. В настоящее время во всем мире насчитывается свыше 40 синхротронных источников, которые позволяют получать рентгеновское излучение в диапазоне длин волн от жесткого ультрафиолета до жесткого рентгеновского излучения с энергией фотонов 30 кэВ и выше. В синхротронах размер источника рентгеновского излучения совпадает с размером поперечного сечения электронного пучка и, как правило, меньше чем 1 мм. Например, размер источника рентгеновского излучения для синхротрона второго поколения в Стэнфордской лаборатории синхротронного излучения (SSRL, США) составляет около  $440 \times 1700$  мкм<sup>2</sup>, а для синхротрона третьего поколения APS (США) размер источника составляет  $23 \times 97$  мкм<sup>2</sup>. Определение размера источника синхротронного излучения представляет достаточно сложную задачу, которая тем не менее может быть решена с использованием многоэлементных преломляющих рентгеновских линз, как это будет показано ниже.

Цель данной работы состоит в определении размеров источника синхротронного излучения и фокусного пятна микрофокусной рентгеновской трубки с использованием нового элемента рентгеновской оптики – многоэлементной преломляющей рентгеновской линзы.

### Основная часть

Рассмотрим рентгенооптические характеристики многоэлементной преломляющей рентгеновской линзы, состоящей из  $N$  двояковогнутых микролинз с радиусом кривизны  $R$  каждая. Фокусное расстояние такой многоэлементной линзы рассчитывается по следующей формуле:

$$f = \frac{R}{2Nd}, \quad (1)$$

где  $R$  – радиус кривизны линзы;  $N$  – число микролинз;  $(1-\delta)$  – действительная часть комплексного показателя преломления [2].

Преломляющая рентгеновская линза, как и линза для видимого диапазона спектра, является изображающим устройством: 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:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}, \quad (2)$$

$$S_1 = S \frac{f}{a-f}, \quad (3)$$

где  $b$  – расстояние от линзы до плоскости изображения;  $f$  – фокусное расстояние рентгеновской линзы. Таким образом, если с помощью преломляющей рентгеновской линзы получить изображение источника излучения и измерить его, то при помощи соотношений (2) и (3) можно определить его размер  $S$ .

Для определения размеров источников рентгеновского излучения были использованы многоэлементные преломляющие рентгеновские линзы, разработанные в НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ [3–7]. Линза выполнена в виде стеклянного капилляра, внутри которого сформировано заданное число (от 10 до 350) двояковогнутых сферических эпоксидных микролинз с радиусом кривизны  $R$ , равным радиусу капилляра. Результаты исследования рентгенооптических параметров указанных линз на синхротронах SSRL и APS приведены в [4, 5], где показано, что линзы фокусируют рентгеновские лучи с энергией фотонов от 7 до 18 кэВ в пятно размером в несколько микрон.

В настоящем исследовании для получения изображения источников излучения были использованы 2 рентгеновские линзы: линза № 1 выполнена в виде стеклянного капилляра диаметром 200 мкм, внутри которого сформированы 103 сферические эпоксидные микролинзы; линза № 2 выполнена в виде стеклянного капилляра диаметром 100 мкм, в котором сформирована 161 сферическая эпоксидная микролинза. Радиус кривизны отдельной микролинзы для линз № 1 и № 2 составляет 100 мкм и 50 мкм, соответственно. Фотография рентгеновской линзы № 2 приведена на рисунке 1.

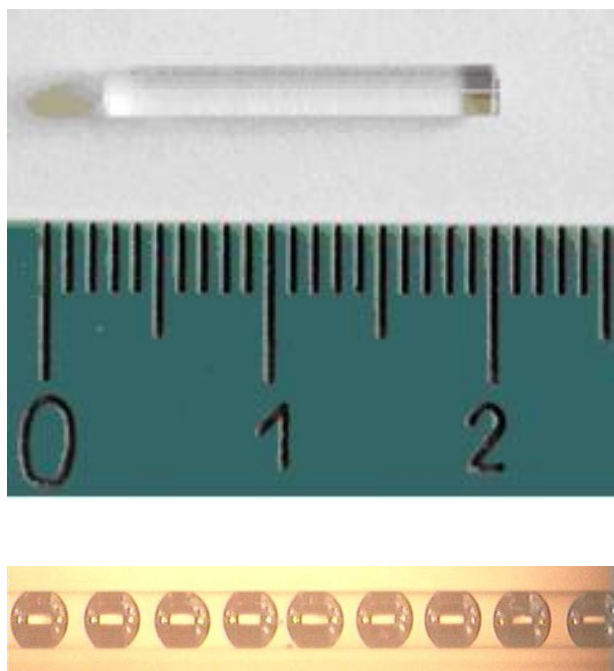


Рисунок 1 – Фотография преломляющей рентгеновской линзы № 2, содержащей 161 микролинзу с радиусом кривизны 50 мкм. Внизу показан капилляр, заполненный микролинзами, которые разделены воздушными пузырями (показаны темным цветом)

Исследования по определению размера синхротронного источника излучения проводились на канале 2–3 синхротрона в Стэнфордской лаборатории синхротронного излучения (США). Пучок рентгеновского излучения от синхротронного источника монохроматизировался с помощью двухкристального монохроматора и направлялся на размещенную в гониометре линзу № 1. Энергия фотонов была выбрана равной 8 кэВ. Расстояние  $a$  от источника излучения до линзы равно 16,81 м. Интенсивность пучка, прошедшего через линзу, измерялась с помощью ионизационного газового детектора, который располагался за линзой. Между детектором и линзой располагалась танталовая щель размером меньше чем 1 микрон. Эта танталовая щель перемещалась перпендикулярно рентгеновскому пучку, чтобы измерить его профиль. Профиль пучка измерялся на различных расстояниях до линзы. Рассчитанное по формуле (1) фокусное расстояние линзы № 1 для фотонов с энергией 8 кэВ равно 128 мм. Согласно формуле (2) положение плоскости изображения линзы для источника, рас-

положенного на расстоянии  $a = 16,81$  м до линзы, равно  $b = 129$  мм. Именно на этом расстоянии до линзы и располагалась танталовая щель, которая перемещалась перпендикулярно пучку для определения профиля интенсивности пучка. На рисунке 2 приведен профиль интенсивности пучка, сфокусированного линзой № 1. Ширина профиля на полувысоте составляет 5,1 мкм. Предполагается, что это значение и есть искомый размер изображения источника  $S_1$  в вертикальном направлении. Пользуясь формулой (3), можно определить размер источника излучения:  $S = 0,66$  мм. Полученное значение параметра  $S = 0,66$  мм удовлетворительно согласуется с известным значением размера источника излучения в вертикальном направлении для указанного канала 2–3 Стэнфордского синхротрона, которое равно 0,44 мм. Основная причина расхождения результата измерения источника излучения с его известным значением состоит в том, что размер рентгеновского пучка в вертикальном направлении определялся с использованием щели, ширина которой меньше чем 1 микрон, и поэтому относительная погрешность в измерении источника составляла около 20 %.

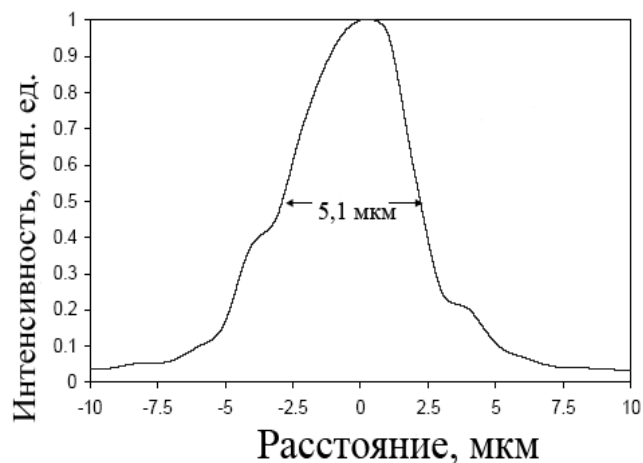


Рисунок 2 – Профиль интенсивности рентгеновского пучка с энергией фотонов 8 кэВ, сфокусированного линзой № 1

Описанный выше метод определения размера источника излучения путем измерения профиля рентгеновского пучка в плоскости изображения линзы может быть существенно улучшен путем визуализации изображения источника излучения с помощью цифровой рент-

геновской камеры. Такие исследования были проведены в кооперации с Чешским техническим университетом в г. Прага.

В качестве объекта исследования была выбрана микрофокусная рентгеновская трубка фирмы BEDE со следующими параметрами: мишень анода медная, размер фокусного пятна  $\sim 50$  мкм, рабочее напряжение 40 кВ, ток – 2 мА.

Для получения изображения фокусного пятна рентгеновской трубки была использована многоэлементная преломляющая рентгеновская линза № 2. Фокусное расстояние линзы, рассчитанное по формуле (1), равно 45 мм для фотонов с энергией 8 кэВ.

Визуализация рентгеновских лучей осуществлялась с помощью рентгеновской камеры REFLEX X-ray micron resolution. Камера содержит пластину сцинтиллятора в виде кристалла LuAG:Ce, объектив для формирования изображения и ПЗС-камеру для записи изобра-

жения. Размер окна камеры  $1,02 \times 0,83$  мм, размер пикселя камеры  $0,645 \times 0,645$  мкм.

Для исследований был изготовлен рентгенооптический стенд, показанный на рисунке 3. Стенд содержит микрофокусную рентгеновскую трубку 1, рентгеновскую камеру 2, управляемый компьютером гониометр 3, держатель в виде «салазок» для размещения линзы с возможностью ее перемещения вдоль оптической оси, рентгеновскую линзу в держателе 5.

Рентгеновская линза располагалась на расстоянии  $a = 250$  мм от фокусного пятна рентгеновской трубки. Положение плоскости изображения линзы (расстояние  $b$ ) рассчитывалось по формуле (2):  $b = 49$  мм. На этом расстоянии от линзы располагалась рентгеновская камера. В соответствии с данной геометрией формирования пучка можно ожидать, что в плоскости изображения будет наблюдаться уменьшенное в  $b/a = 5$  раз изображение источника излучения, т. е. фокусного пятна рентгеновской трубки.

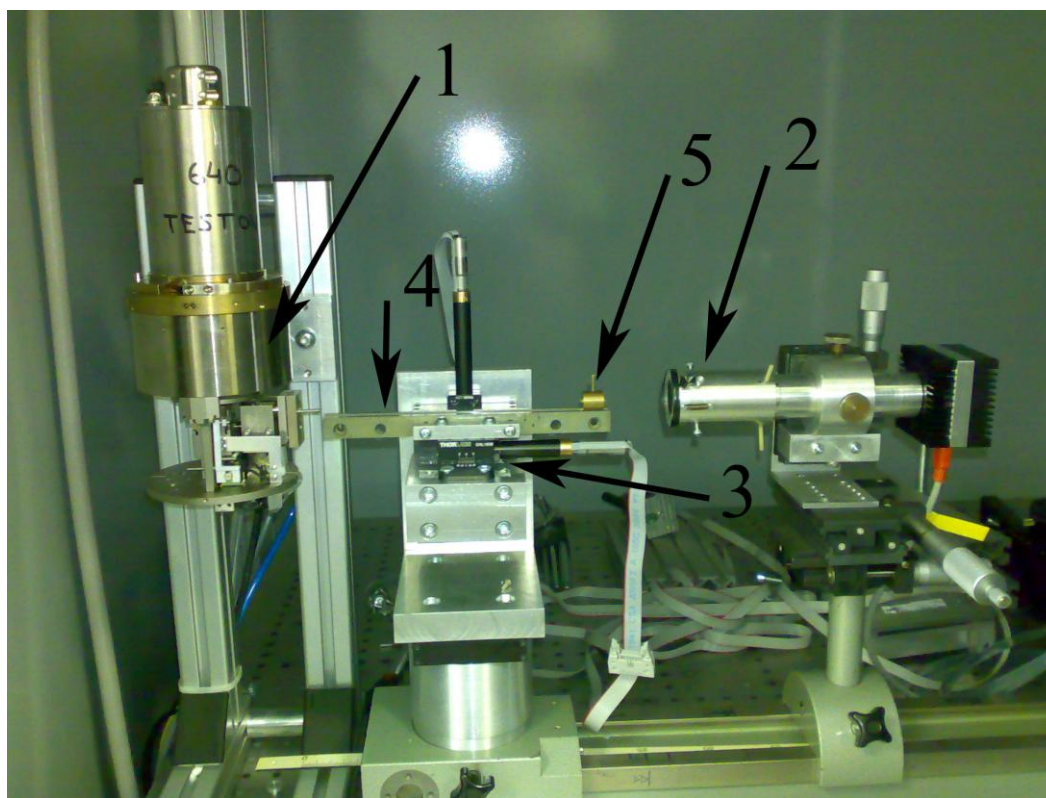


Рисунок 3 – Фотография рентгенооптического стенда для определения размеров фокусного пятна рентгеновской трубки: 1 – микрофокусная рентгеновская трубка, 2 – рентгеновская камера, 3 – гониометр, 4 – «салазки» для размещения линзы, 5 – преломляющая рентгеновская линза в держателе

На рисунке 4 показано пространственное распределение интенсивности рентгеновского пучка сразу за линзой и в плоскости изображения.

Видно, что источник излучения имеет несферическую форму; это обусловлено особенностями системы фокусировки электронного пучка, которая применена в рентгеновской трубке фирмы BEDE. Поскольку размер пикселя камеры меньше чем 1 мкм, то, анализируя изображение, показанное на рисунке 4б, можно установить детали фокусного пятна с разрешением около 1 мкм (2 пикселя камеры). Такой

анализ проведен с использованием компьютерной программы ImageJ, которая позволяет измерять детали изображения в различных направлениях. Проведенный анализ изображения на рисунке 4б показал, что размер пучка в горизонтальном направлении составляет около 12 мкм. Пользуясь формулой (3) можно определить размер фокусного пятна рентгеновской трубки  $S$  в горизонтальном направлении:  $S = 60$  мкм. Этот результат находится в хорошем согласии с паспортными данными 50 мкм для фокусного пятна рентгеновской трубки.



а



б

Рисунок 4 – Изображение рентгеновского пучка, сформированного линзой: а – сразу за линзой ( $b = 0$  мм); б – в плоскости изображения источника излучения ( $b = 49$  мм)

### Заключение

Определены размеры двух источников рентгеновского излучения: синхротронного источника излучения на канале 2–3 в Стэнфордской лаборатории синхротронного излучения (США) и микрофокусной рентгеновской трубки с медным анодом. Для определения размеров источников использовались многоэлементные преломляющие рентгеновские линзы с фокусным расстоянием 128 мм и 45 мм для фотонов с энергией 8 кэВ. Определялись размеры рентгеновского пучка, сформированного линзой в плоскости изображения линзы для источника

излучения. Для измерений рентгеновского пучка использовался метод сканирования пучка с помощью диафрагмы и метод визуализации пучка с использованием цифровой рентгеновской камеры. Установлено, что источник синхротронного излучения имеет размер в вертикальном направлении 0,6 мм, что удовлетворительно согласуется с известным значением 0,44 мм. Установлено, что размер фокусного пятна рентгеновской трубки в горизонтальном направлении равен 60 мкм, что удовлетворительно согласуется с паспортным значением 50 мкм. Описанный метод является перспективным и может быть улучшен путем оптимизации

параметров линзы и рентгеновской камеры для конкретного источника рентгеновского излучения.

### Список использованных источников

1. *Кумахов, А.А.* Методика измерения источников рентгеновского и нейтронного излучения с помощью поликапиллярной оптики [Текст] / А.А. Кумахов, И.В. Дмитриев // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т. 81, Вып. 6. – С. 85–87.
2. *Snigirev, A. A.* Compound refractive lens for X-ray focus [Text] / A. Snigirev [et al.] // Nature-1996. –V. 384. – P. 49–51.
3. *Dudchik, Yu.I.* A microcapillary lens for X-rays [Text] / Yu.I. Dudchik, N.N. Kolchevsky // Nucl. Instr. Meth. A. – 1999. – Vol. 421. – P. 361–364.
4. *Dudchik, Yu. I.* Microspot X-ray focusing using short-focal length compound lenses [Text] / Yu. I. Dudchik [et al.] // Rev. Sci. Instr. – 2004. –V. 75. – № 11. – P. 4651–4655.
5. *Dudchik, Yu. I.* Using of a microcapillary refractive X-ray lens for focusing and imaging [Text] / I. Dudchik [et al.] // Spectrochimica Acta. – 2007. – V. B 62. – P. 598–602.
6. *Дудчик, Ю.И.* Многоэлементная сферическая преломляющая линза для формирования микро- и наноразмерных пучков рентгеновского излучения [Текст] / Ю. И.Дудчик // Вест. Белорус. гос. ун-та. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. – 2008.– № 2. – С. 26–30.
7. *Дудчик, Ю.И.* Рентгеновская микроскопия с использованием синхротронного излучения и элементов преломляющей рентгеновской оптики [Текст] / Ю.И. Дудчик [и др.] // Вест. Белорус. гос. ун-та. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. – 2010. – № 2. – С. 24–28.

---

Dudchik Yu.I.

### Measuring of X-ray source size by using compound refractive X-ray lens

Compound refractive lens was used for measuring size of 2-3 beamline Stanford synchrotron radiation source and a size of microfocus X-ray tube. X-ray beam from the source was focused by the lens and parameters of the beam at image plane were measured. Scanning diaphragm and X-ray CCD-camera were used for measuring X-ray beam. It was found that the vertical size of synchrotron source is equal to 0,6 mm and the size of the X-ray tube focal spot is equal to 60 micrometers. (E-mail: dudchik@bsu.by)

**Key Words:** X-rays, synchrotron radiation, X-ray tube, compound refractive X-ray lens.

*Поступила в редакцию 02.09.2011.*