

МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЕ ПРЕЛОМЛЯЮЩИЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ ЛИНЗЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ И ОБЪЕКТОВ

Ю. И. Дудчик

Начно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета

Разработана многоэлементная преломляющая линза для рентгеновских лучей с относительно коротким фокусным расстоянием: для фотонов с энергией 8 кэВ это расстояние составляет 5 см. Линза выполнена в виде стеклянного капилляра, заполненного большим числом (100–300) двояковогнутых сферических микролинз из эпоксидной смолы. Оптические параметры разработанных линз были исследованы на 8 синхротронах в Японии, США, Корее, Китае, РФ. Например, установлено, что рентгеновская линза, состоящая из 350 микролинз с радиусом кривизны 100 микрон каждая, фокусирует рентгеновские лучи с энергией фотонов 18 кэВ в пятно размером 1,5 мкм. Рентгеновские линзы использовались в качестве объектива рентгеновского микроскопа с синхротронным или лабораторным источником излучения. Перспективно использовать линзы для получения изображения лазерно-плазменных источников излучения.

1. Введение

Рентгеновские лучи, открытые более 100 лет назад, по-прежнему остаются уникальным инструментом в научных исследованиях, медицине, промышленности. За прошедшие годы после открытия рентгеновских лучей существенно изменилась и рентгеновская техника: если еще 50 лет назад основным источником рентгеновского излучения являлась рентгеновская трубка, то сейчас – это синхротрон, а в ближайшей перспективе – рентгеновский лазер на свободных электронах. 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.

2. Многоэлементная преломляющая рентгеновская линза

Поскольку показатель преломления рентгеновских лучей в веществе отличается от единицы

на величину порядка 10^{-6} , то в течение 100 лет после открытия Рентгена рентгеновская преломляющая оптика рассматривалась как неэффективная, и в качестве оптического устройства, например, для получения изображения плазменных источников рентгеновского излучения, использовали микро-диафрагму (pin-hole). И только после появления в 1996 г. многоэлементной преломляющей рентгеновской линзы [1], их начали использовать в рентгеновской технике вместо pin-hole.

Многоэлементная преломляющая рентгеновская линза состоит из большого числа (50 и более) двояковогнутых микролинз, расположенных соосно. Линзы выполнены из материала, содержащего элементы с небольшим порядковым номером, такие как бериллий, литий, углерод или полимер. Радиус кривизны отдельной микролинзы составляет 50–200 мкм. Идеальная преломляющая линза может быть использована для фокусировки рентгеновских лучей в пятно размером в десятки нанометров, на практике получено пятно размером около 200 нм.

В НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ разработаны многоэлементные преломляющие линзы для рентгеновских лучей с относительно коротким фокусным расстоянием [2–4]. Линза выполнена в виде стеклянного капилляра, заполненного большим числом (100–300) двояковогнутых эпоксидных микролинз. Радиус кривизны отдельной микролинзы совпадает с радиусом канала капилляра и, благодаря этому, становится возможным соз-

дать линзы с радиусом кривизны поверхности, равным 10–50 мкм, что трудно реализовать другими известными методами. На рис. 1 показаны фотографии преломляющей рентгеновской линзы, содержащей 161 сферическую микролинзу с радиусом кривизны 50 мкм, и оксидных микролинз внутри стеклянного капилляра с радиусом кривизны 100 мкм.

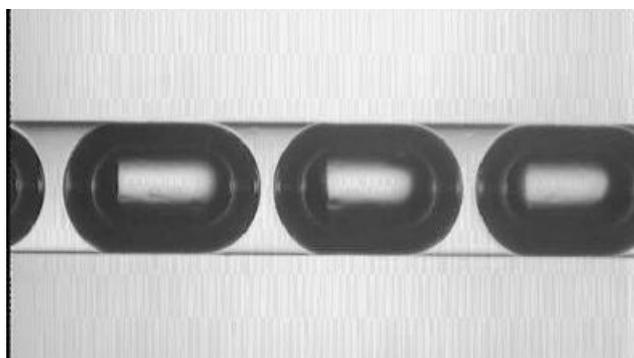
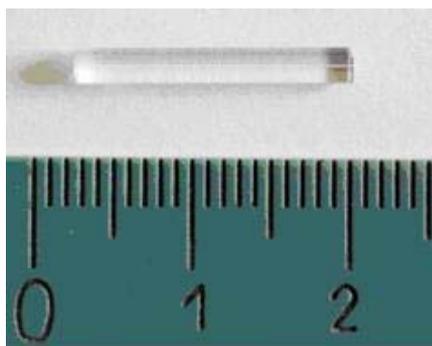


Рис. 1. Фотографии преломляющей рентгеновской линзы, содержащей 161 микролинзу с радиусом кривизны 50 мкм (слева) и оксидных микролинз внутри стеклянного капилляра с радиусом кривизны 100 мкм (справа)

Преломляющая рентгеновская линза, как и линза для видимого излучения, позволяет получать 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. Размер фокусного пятна S_1 рентгеновской линзы можно определить, пользуясь следующими, хорошо известными из оптики, формулами линзы:

$$1/a + 1/b = 1/f, \quad (1)$$

$$S_1 = S f / (a - b), \quad (2)$$

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, N – число микролинз. Если источник излучения удален достаточно далеко от линзы, то размер изображения источника приближается к размеру дифракционного пятна, радиус которого R_{dif} рассчитывается по следующей формуле:

$$R_{dif} = 0,61\lambda f / Ra, \quad (3)$$

где Ra – апертура линзы, λ – длина волны.

В таблице 1 приведены параметры синхротронов SSRL (США), APS (США), ANKA (Германия), ESRF (Франция), на которых испытывались линзы, разработанные в НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ. В графе «размер источника» указаны размеры источника (FWHM) в двух направлениях – вертикальном и горизонтальном.

Таблица 1
Параметры синхротронов, на которых испытывались рентгеновские линзы, разработанные в НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ

Название синхротрона, номер линзы	Расстояние от источника до линзы, м	Размер источника излучения, мкм× мкм	Энергия фотонов
SSRL, линза № 1	16,8	400×1700	7 кэВ, 8 кэВ
APS, линза № 2	58	23×97	18 кэВ, 20 кэВ
ANKA, линза № 3	12,7	250×800	12 кэВ, 14 кэВ
ESRF, линза № 4	55	80×250	18 кэВ

В таблице 2 суммированы результаты измерений фокусного расстояния (вернее положения плоскости изображения) и фокального пятна для линз №№ 1–4, которые отличаются числом микролинз. Линза № 1 содержит 102 сферические микролинзы, линза № 2 – 349 микролинз, линза № 3 – 224 микролинзы, линза № 4 – 112 микролинз. Радиус кривизны поверхности у всех линз равен 100 мкм.

Таблица 2
Результаты измерений параметров линз №№ 1–4.

Номер линзы	1	1	2	2	3	3	4
Энергия фотонов, кэВ	8	7	18	20	12	14	18
Число микролинз в линзе	102	102	349	349	224	224	112
Радиус кривизны микролинзы, мкм	100	100	100	100	100	100	100
Измеренное расстояние b , мм	140	100	208	250	146	195	575
Рассчитанное расстояние b , мм	126	97	192	240	147	195	590
Измеренное фокусное пятно, мкм	2,7	4	1,5	2,1	2,2	3,0	2,7
Рассчитанный размер фокусного пятна, мкм	3,2	2,7	0,08	0,1	2,5	3,3	0,8

Из таблицы 2 видно, что наблюдается хорошее согласие между рассчитанными и измеренными размерами пучка в плоскости изображения. Размер пучка составляет несколько микрометров, поэтому линзы, разработанные в НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ перспективны для формирования микропучков рентгеновского излучения.

3. Рентгеновский микроскоп

Разработанная короткофокусная многоэлементная преломляющая рентгеновская линза может быть использована в качестве объектива микроскопа с лабораторным источником излучения [2,5–6]. Микроскоп разработан в НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ, его фотография приведена на рис. 2.

Микроскоп состоит из источника излучения 1 в виде рентгеновской трубки, преломляющей рентгеновской линзы 2, рентгеновской камеры 3, держателя для объекта 4, гониометра 5, в котором размещена линза.



Рис. 2. Фотография макета рентгеновского микроскопа

Объект располагается между источником излучения и линзой. Положение объекта и камеры относительно линзы определяется с помощью формулы линзы (1). В качестве объектива микроскопа использовалась преломляющая рентгеновская линза, которая была выполнена в виде стеклянного капилляра, внутри которого сформирована 161 двояковогнутая сферическая микролинза с радиусом кривизны 50 мкм каждая. Длина линзы – 18 мм, фокусное расстояние для фотонов с энергией 8 кэВ составляет 41 мм. Фотография линзы приведена на рис. 1.

В качестве источника излучения использовалась серийная рентгеновская трубка БСВ-17 с медным анодом. Рабочее напряжение на аноде трубки – 20 кВ, анодный ток – 14 мА. Энергия фотонов характеристического излучения меди равна 8 кэВ.

В качестве рентгеновской камеры для регистрации изображения пучка была использована камера фирмы Photonic Science (модель FDI VHR). Камера состоит из блока детектирования, блока питания, водяного насоса для охлаждения блока детектирования, компьютера с платой видеозахвата 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 мм, число пикселей равно 4008×2670. Размер одного пикселя на входе камеры равен 4,5 мкм.

В качестве тестового объекта была выбрана золотая сетка № 1000. Проволоки сетки имеют толщину 5 мкм, расстояние между проволоками равно 20,4 мкм.

Методика получения изображения объектов в рентгеновских лучах с использованием рентгеновской линзы состоит в следующем. Вначале система, состоящая из источника рентгеновских лучей, преломляющей рентгеновской линзы и рентгеновской камеры, юстировалась. При этом рентгеновская камера располагалась на заданном расстоянии, например, $b = 440$ мм от линзы, где b входит в формулу 1. После этого производилась съемка «расфокусированного» источника излучения, поскольку источник излучения располагался на расстоянии, превышающем значение a (формула линзы 1). После того, как изображение источника было получено, производилась съемка объекта, который располагался на расстоянии $a = 45$ мм от линзы в соответствии с формулой линзы 1. Увеличение микроскопа M при этом равно 9,8. Поскольку изображение объекта обладает слабым контрастом, то для увеличения контраста изображения

над файлами, которые соответствуют изображению источника и изображению объекта, была проведена процедура вычитания. Экспозиция составляла от 5 мин до 10 мин. В результате проведенных исследований было получено увеличенное в 9,8 раз изображение тестового объекта, показанное на рис. 3.

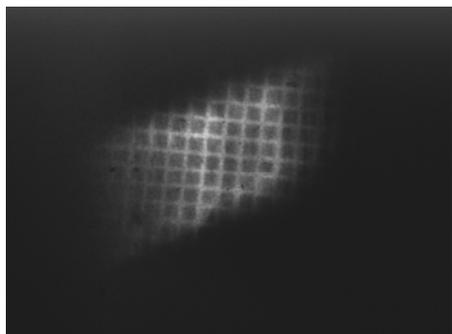


Рис. 3. Изображение сетки № 1000, полученное с помощью микроскопа

На изображении отчетливо наблюдаются металлические проволоки диаметром 5 мкм, что позволяет сделать вывод о том, что разрешение микроскопа лучше, чем 5 мкм. Проведенный дополнительный анализ изображения показал, что разрешение микроскопа составляет около 3–4 мкм.

Основной причиной, влияющей на качество изображения объекта, являются хроматические и сферические aberrации системы. Для устранения хроматических aberrаций нами были проведены дополнительные исследования с монохроматическим источником излучения. Исследования проводились на синхротроне в г. Хэфэй (Китай) в кооперации с партнерами из КНР [7]. Энергия фотонов рабочего пучка синхротрона была выбрана равной 8 кэВ. Получено изображение тестового объекта в виде золотой сетки № 1500 в рентгеновских лучах при увеличении 11,6. Проведенный анализ контраста изображения, показал, что разрешение системы в случае использования монохроматического источника излучения составляет 2–3 мкм. Дальнейшее улучшение разрешения оптической системы до величины в 1 мкм и лучше может быть осуществлено путем использования диафрагмы с радиусом отверстия равным $0,3 R$, где R – радиус кривизны линзы.

4. Определение размеров источников излучения

Разработанная рентгеновская линза была использована для определения размеров и формы

фокусного пятна рентгеновской трубки с пространственным разрешением около 1 мкм. Фокусное пятно рентгеновской трубки является важным параметром, который 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», фотографирование фокусного пятна с использованием камеры с небольшим отверстием (pinhole). 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 размеров фокусного пятна микрофокусных рентгеновских трубок с разрешением лучше, чем 5 мкм.

Для получения изображения фокусного пятна рентгеновской трубки вместо камеры с небольшим отверстием (pinhole) нами была использована многоэлементная преломляющая рентгеновская линза, показанная на рис. 1 и содержащая 161 микролинзу. Исследования проводились в кооперации с Чешским техническим университетом в Праге. Для исследований был изготовлен рентгенооптический стенд, показанный на рис. 4. Стенд содержит микрофокусную рентгеновскую трубку 1, рентгеновскую ПЗС-камеру – 2, управляемый компьютером гониометр – 3, держатель для размещения линзы – 4, 5 – преломляющая рентгеновская линза в оправе.



Рис. 4. Фотография рентгенооптического стенда для исследования оптических параметров рентгеновского пучка. 1 – микрофокусная рентгеновская трубка, 2 – рентгеновская ПЗС-камера, 3 – гониометр, 4 – держатель для размещения линзы, 5 – преломляющая рентгеновская линза в оправе

В качестве источника рентгеновских лучей была выбрана микрофокусная трубка фирмы BEDE со следующими параметрами: мишень анода медная, размер фокусного пятна ~50 мкм, рабочее напряжение 40 кВ, ток – 2 мА.

Для визуализации рентгеновских лучей использовались рентгеновская камера фирмы REFLEX со следующими параметрами: сцинтиллятор LuAG: Ce, размер окна камеры 1,02×0,83 мм, размер пикселя камеры 0,645×0,645 мкм.

Фокусное расстояние использованной в работе многоэлементной преломляющей линзы равно 41 мм для фотонов с энергией 8 кэВ.

В исследованиях рентгеновская линза располагалась на расстоянии $a = 250$ мм от фокусного пятна рентгеновской трубки. Положение плоскости изображения линзы (расстояние b) рассчитывалось по формуле (1): $b = 49$ 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, то есть фокусного пятна рентгеновской трубки.

На рис. 5 показано изображение рентгеновского пучка сразу за линзой и в плоскости изображения линзы. Видно, что источник излучения (фокусное пятно рентгеновской трубки) имеет несферическую форму, что 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 рис. 2 (б), можно установить детали фокус-

ного пятна с разрешением около 1 мкм (2 пикселя камеры).

Заключение

Проведенные исследования показали перспективность использования преломляющей рентгеновской линзы для формирования рентгеновских микропучков и получения изображения объектов и источников излучения с пространственным разрешением около 1 мкм и лучше.

Список литературы

1. Snigirev A., Kohn V., Snigireva I., Lengeler B. A compound refractive lens for focusing high-energy X-rays // Nature. 1996. Vol. 384, N.6604. P.49-51B.
2. 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.
3. Dudchik Yu. I., Komarov F. F., Piestrup M. A., Gary C. K., Park H., Cremer J. T. Using of a microcapillary refractive X-ray lens for focusing and imaging // Spectrochimica Acta, 62B. 2007. P. 598–602.
4. Дудчик Ю. И. Многоэлементная сферическая преломляющая линза для формирования микро- и наноразмерных пучков рентгеновского излучения // Вест. Белорус. гос. ун-та. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. 2008. № 2. С. 26–30.
5. Дудчик Ю. И. Рентгеновский проекционный микроскоп с протяженным источником излучения и объективом на основе преломляющей



а



б

Рис. 5. Изображение рентгеновского пучка, сформированного линзой: (а) сразу за линзой ($b = 0$ мм); (б) в плоскости изображения источника излучения ($b = 49$ мм).

линзы // Вест. Белорус. гос. ун-та. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. 2007. № 1. С. 32–38.

6. Дудчик Ю. И. Рентгеновский микроскоп на основе короткофокусной многоэлементной преломляющей линзы // Вест. Белорус. гос. ун-та. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. 2009. № 2. С. 38–43.

7. Рентгеновская микроскопия с использованием синхротронного излучения и элементов преломляющей рентгеновской оптики / Ю. И. Дудчик, Ч. Хуанг, Б. Му, Т. Ванг, Г. Пан // Вест. Белорус. гос. ун-та. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. 2010. № 2. С. 38–43.