УДК 539.21, 535.317.61-34, 548.732

Ю.И. ДУДЧИК

РЕНТГЕНОВСКИЙ МИКРОСКОП НА ОСНОВЕ КОРОТКОФОКУСНОЙ МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ ПРЕЛОМЛЯЮЩЕЙ ЛИНЗЫ

X-ray microscope is designed. The microscope consists of *X*-ray source in the form of copper anode *X*-ray tube, short focal length compound refractive *X*-ray lens and CMOS camera. The *X*-ray lens is designed in the form of glass capillary filled by 161 concave epoxy microlenses with 50 microns curvature radius each. Microscope spatial resolution power is equals to 3–4 microns, field of view is about 200 microns.

Рентгеновская микроскопия является уникальным методом неразрушающего контроля, позволяющим получать информацию о внутренней структуре объектов на микронном и субмикронных уровнях. Простейший рентгеновский микроскоп состоит из микрофокусной рентгеновской трубки и рентгеновской камеры или фотопленки, между которыми располагается объект для исследования. Разрешающая способность указанного микроскопа ограничена размером источника излучения и, как правило, не превышает 1÷5 микрон. Улучшить разрешающую способность микроскопа можно за счет использования элементов изображающей рентгеновской оптики, к числу которых относятся зонные

пластинки и многоэлементные преломляющие рентгеновские линзы. Поскольку преломление рентгеновских лучей в среде мало, то в течение почти 100 лет считалось, что преломляющая оптика для рентгеновского диапазона не эффективна и поэтому создание рентгеновского микроскопа с объективом (как для оптики видимого диапазона) невозможно. Однако ситуация изменилась после того, как в 1996 г. была предложена конструкция многоэлементной преломляющей рентгеновской линзы [1], состоящей из большого числа (100 и более) двояковогнутых соосно расположенных микролинз. Чтобы уменьшить поглощение, микролинзы выполняются из материала, слабо поглощающего рентгеновское излучение, например бериллия, лития, углерода, алюминия или полимера. Радиус кривизны отдельной микролинзы составляет 100÷200 мкм или меньше. Перспективы преломляющей рентгеновской оптики, а также проблемы, связанные с изготовлением и использованием линз, частично рассмотрены в [2].

В НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ разработана многоэлементная преломляющая линза для рентгеновских лучей и исследованы ее рентгенооптические характеристики [3–9]. 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, как это описано в [3, 4]. Линза использовалась для фокусировки рентгеновского излучения от синхротронных источников в пятно микронных размеров [5]. Кроме того, проведенные расчеты показали, что разработанные линзы могут применяться при формировании наноразмерных пучков [6].

Как и линза для видимого излучения, преломляющая линза для рентгеновских лучей является изображающим устройством и может быть использована в качестве объектива рентгеновского микроскопа, как это ранее нами показано для случая лабораторного источника излучения [7–9]. Микроскоп состоит из рентгеновской трубки с медным анодом, преломляющей рентгеновской линзы и рентгеновской камеры для регистрации изображения объекта. Объект располагается между источником излучения и линзой. Положение объекта и камеры относительно линзы определяется с помощью известной из оптики видимого излучения формулы линзы:

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

где a – расстояние от источника излучения до линзы, b – от линзы до камеры, f – фокусное расстояние линзы.

Микроскоп работает следующим образом. Рентгеновские лучи от рентгеновской трубки проходят через объект, испытывая при этом рассеяние и поглощение. Рассеянные лучи от каждой точки на плоскости объекта фокусируются линзой в соответствующую точку на плоскости изображения, где располагается рентгеновская камера, и формируют изображение объекта. Рентгеночувствительный экран камеры содержит пиксели, каждый из которых имеет линейный размер S. Наблюдается однозначное соответствие между размерами пикселя и области S_1 на плоскости объекта, излучение из которой попадает в заданный пиксель:

$$S_1 = S\frac{a}{b}.$$

Если размер пикселя составляет, например, 10 мкм, то, располагая объект на расстоянии от линзы, равном 1,1 f, а камеру – в соответствии с формулой линзы – на расстоянии 10 f от линзы, можно получить увеличенное примерно в 10 раз изображение объекта, что соответствует пространственному разрешению системы на уровне в 1 мкм. Если размер пикселя камеры задан, то для улучшения разрешающей способности системы предпочтительнее использовать рентгеновские линзы с более коротким фокусным расстоянием, поскольку при этом увеличивается линейный угол детектора (s/b), что, в свою очередь, приводит к увеличению интенсивности излучения на детекторе. Ранее в исследованиях [7–9] мы использовали рентгеновские линзы с фокусным расстоянием 10÷13 см для фотонов с энергией 8 кэВ. Радиус кривизны отдельной микролинзы составлял 100 мкм. Разработанная нами методика изготовления преломляющих линз позволяет формировать микролинзы в стеклянных капиллярах с радиусом канала, равным, например, 50 мкм, и в итоге – уменьшить фокусное расстояние линзы до величины в 40÷50 мм. Такие линзы могут быть названы короткофокусными, поскольку фокусное расстояние рентгеновских линз, разработанных другими методами [2], измеряется десятками сантиметров.

Целью данной работы является выяснение разрешающей способности и поля зрения рентгеновского микроскопа, в котором в качестве объектива используется короткофокусная многоэлементная преломляющая рентгеновская линза. Знание указанных параметров необходимо для определения области практического применения устройства.

Оптические параметры системы

Фокусное расстояние f рентгеновской линзы, состоящей из N микролинз с радиусом кривизны R, определяется как [1]:

$$f = \frac{R}{2N\delta}, \tag{2}$$

где $(1–\delta)$ – действительная часть комплексного показателя преломления $n = 1–\delta–i\beta$, $i\beta$ – мнимая часть, $\beta = 1/(4\pi)\mu\lambda$, μ – линейный показатель ослабления, λ – длина волны. Для эпоксидной смолы, которая использовалась в качества материала для линз, $\delta = 3{,}78\cdot10^{-6}$, $\beta = 7{,}16\cdot10^{-9}$ для фотонов с энергией 8 кэВ.

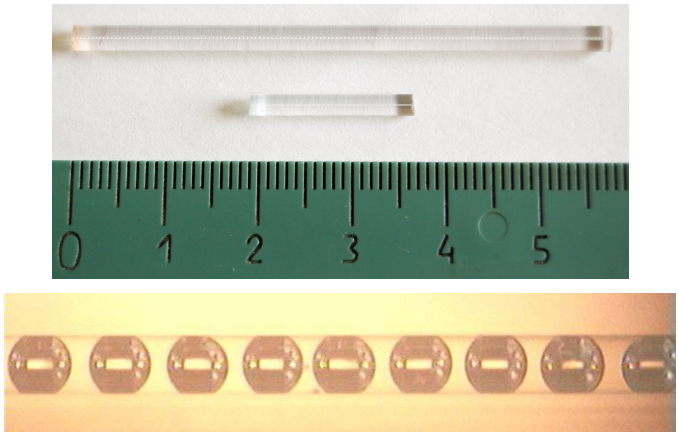

Рис. 1. Фотография рентгеновских линз № 1 (нижняя) и № 2 (верхняя). Показана фотография части линзы № 1 при большем увеличении

Фотографии рентгеновских линз, которые использовались в качестве объектива рентгеновского микроскопа, показаны на рис. 1. Линза представляет собой стеклянный микрокапилляр, внутри которого сформированы микролинзы. Линза № 1 длиной 18 мм содержит 161 двояковогнутую микролинзу с радиусом кривизны 50 мкм каждая, линза № 2 – 137 микролинз с радиусом кривизны 100 мкм каждая. Несмотря на то что число микролинз в линзе № 1 больше, чем в линзе № 2, ее длина более чем в два раза меньше, чем длина линзы № 2. Это связано с улучшением методики формирования микролинз, которая позволила при изготовлении линзы № 1 уменьшить расстояние между микролинзами. Линза № 2 ранее использовалась в исследованиях, описанных в [8, 9], и ее фотография приведена здесь для сравнения. Фокусное расстояние линзы № 2 для фотонов с энергией 8 кэВ равно 90 мм, фокусное расстояние линзы № 1 для фотонов с такой же энергией, рассчитанное по (2), составляет 41 мм. Формула (2) применима для тонкой линзы. Для «толстой» линзы длиной t формула фокусного расстояния f_t записывается следующим образом [10]:

$$f_t = f\,\frac{\sqrt{\frac{t}{f}}}{\sin\sqrt{\frac{t}{f}}}, \tag{3}$$

где f – фокусное расстояние, рассчитанное по (2). Величина f_t измеряется от одной из двух (более дальней к фокальной плоскости) главных плоскостей линзы, расстояние между которыми d определяется как [10]:

$$d = f_t\left[1 - \cos\left(\frac{t}{f_t}\right)^{1/2}\right]. \tag{4}$$

Фокусное расстояние линзы № 1, рассчитанное по (3), равно: f_t=44,1 мм. Поскольку расстояние между главными плоскостями линзы d равно 8,69 мм (4), то значение f_t для линзы № 1 достаточно хорошо совпадает с фокусным расстоянием f, рассчитанным по (2) для тонкой линзы, с учетом того, что f измеряется от середины линзы. Поэтому в эксперименте положение объекта и камеры находили по (1) для тонкой линзы, а расстояние измерялось от центра линзы.

Рентгеновские лучи, распространяющиеся в «толстой» линзе параллельно ее оси, ослабляются из-за поглощения в материале линзы, поэтому можно считать, что линза обладает «естественной» апертурой, радиус которой r_a рассчитывается по следующей формуле [5]:

$$r_a = \left(\frac{2R}{\mu N}\right)^{\frac{1}{2}}, \tag{5}$$

где μ – линейный коэффициент ослабления излучения в материале линзы. «Толстая» линза имеет ограниченное поле зрения, оценить которое можно, пользуясь следующей моделью. Линза рассматривается как цилиндр длиной t, а радиус канала равен r_a. Если объект расположен на расстоянии a до линзы, то поле зрения линзы ограничено теми лучами, которые пересекают плоскость объекта и которые также проходят через центр линзы и ее входную апертуру с радиусом r_a, находящуюся на расстоянии 0,5 t от центра линзы. Простые геометрические расчеты показывают, что поле зрения линзы FOV равно следующей величине:

$$\mathrm{FOV} = 4\frac{r_a a}{t}.$$

Параметр r_a (5) для линзы № 1 равен 32,6 мкм, длина линзы 18 мм, поэтому, если объект расположен, например, вблизи фокальной плоскости (a = 41 мм), то FOV = 297 мкм.

Пространственная разрешающая способность рентгеновской линзы определяется параметром

$$R_{\mathrm{dif}} = 0,61\frac{\lambda f}{Ra},$$

смысл которого состоит в том, что рентгеновские лучи от удаленного источника фокусируются линзой в дифракционное пятно с радиусом R_{dif}. Расчеты показывают, что для линзы № 1 R_{dif} = 0,1 мкм.

Экспериментальные исследования

На рис. 2 приведена фотография разработанного нами микроскопа с объективом на основе короткофокусной рентгеновской линзы.

Микроскоп состоит из рентгеновской трубки 1, объектива в виде преломляющей рентгеновской линзы 2, рентгеновской камеры 3 на основе CMOS-сенсора, держателя образцов 4 и гониометра для юстировки оптической системы 5. Держатель образцов может перемещаться вдоль оптической оси системы на «салазках», которые закреплены в гониометре вместе с держателем линзы.

В качестве объектива микроскопа использовалась линза № 1 с фокусным расстоянием 41 мм для фотонов с энергией 8 кэВ.

Источником излучения являлась рентгеновская трубка БСВ-17 с медным анодом и фокусным пятном размером 0,6 × 8 мм. Угол между зеркалом анода и рабочим пучком составлял 6 °. Рентгеновская трубка охлаждалась водой. 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 объекта была использована телевизионная CMOS-камера фирмы Marshal (модель V-XA076 B/W) для видимого излучения [9]. Защитное стекло камеры было удалено, чтобы повысить чувствительность сенсора к рентгеновскому излучению. Размер рабочей области рентгеновской камеры по диагонали составлял 0,84 см, число пикселей 510 × 492, размер одного пикселя камеры 10 × 13,5 мкм. Для получения изображения объекта в цифровом виде было использовано программное обеспечение, позволяющее суммировать видеосигнал от камеры.

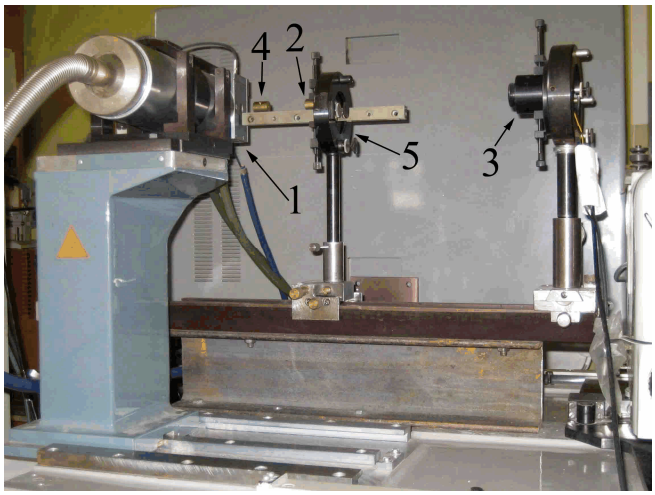

Рис. 2. Фотография рентгеновского микроскопа: 1 – рентгеновская трубка в кожухе; 2 – преломляющая рентгеновская линза в держателе; 3 – рентгеновская камера; 4 – держатель для образцов; 5 – гониометр

В качестве тестового объекта была выбрана золотая сетка № 1000, используемая в электронной микроскопии: число 1000 означает количество ячеек на дюйм. Проволока сетки имеет толщину 5 мкм, расстояние между ячейками равно 20,4 мкм.

Методика проведения эксперимента заключается в следующем. Вначале проводилась юстировка оптической системы, состоящей из рентгеновской трубки, линзы и камеры. Расстояние от мишени анода рентгеновской трубки до линзы 115 мм.

Объект исследования находился между рентгеновской трубкой и линзой (см. рис. 2). Объект и камера располагались на расстояниях a и b от линзы в соответствии с (1). Вначале проводилась съемка рабочего пучка излучения, формируемого линзой для случая, когда объект исследования отсутствовал. При этом линза формировала изображение источника излучения, которое согласно (1) расположено на расстоянии 64 мм от линзы. Камера устанавливалась на расстоянии b, которое значительно превышало 64 мм, т. е. камера регистрировала «расфокусированное изображение» источника излучения. Полученное изображение рентгеновского пучка на расстоянии b от линзы можно обозначить как № 1. На следующем этапе в рабочий пучок помещался объект исследования и регистрировалось его изображение. Обозначим его как № 2. В эксперименте расстояние a выбиралось из условия, что $f < a < 2f$, поэтому № 2 является увеличенным изображением объекта. Изображение № 2 относительно слабо контрастное, что связано с наличием фона от источника излучения, который обусловлен теми рентгеновскими лучами, которые прошли через объект без рассеяния. Поэтому для усиления контраста изображения объекта над файлами, соответствующими изображениям № 1 и № 2, программными методами была проведена процедура вычитания. Результат рассматривается как изображение объекта [7]. В эксперименте рентгеновская камера располагалась на различных расстояниях b до линзы (положение объекта при этом находили по (1)), что позволяло получать изображения с различным увеличением M, которое определялось как b/a. Экспозиция составляла 105 с.

На рис. 3 показано изображение золотой сетки № 1000, полученное с помощью рентгеновского микроскопа при увеличении M, равном 4,4; 6,6; 7,4. На рисунке отчетливо просматриваются проволоки, составляющие сетку и имеющие диаметр 5 мкм, что свидетельствует о достигнутом пространственном разрешении лучше, чем 5 мкм. Более детальный анализ распределения плотности почернения изображения сетки показал, что разрешение микроскопа составляет 3÷4 мкм. Это разрешение несколько меньше ожидаемого, которое можно оценить следующим образом. Поскольку размер пикселя рентгеновской камеры равен 10 × 13,5 мкм, то при увеличении микроскопа, равном 7,4, в один пиксель камеры попадают фотоны с участка объекта, размер которого составляет 1,35 × 1,8 мкм. Существует целый ряд причин, которые могут привести к ухудшению разрешения системы. Это сферические и хроматические аберрации линзы, шумы камеры, механические вибрации микроскопа, несовершенство объекта, который использовался для тестирования. Названные причины планируется устранить поэтапно в ходе дальнейших исследований.

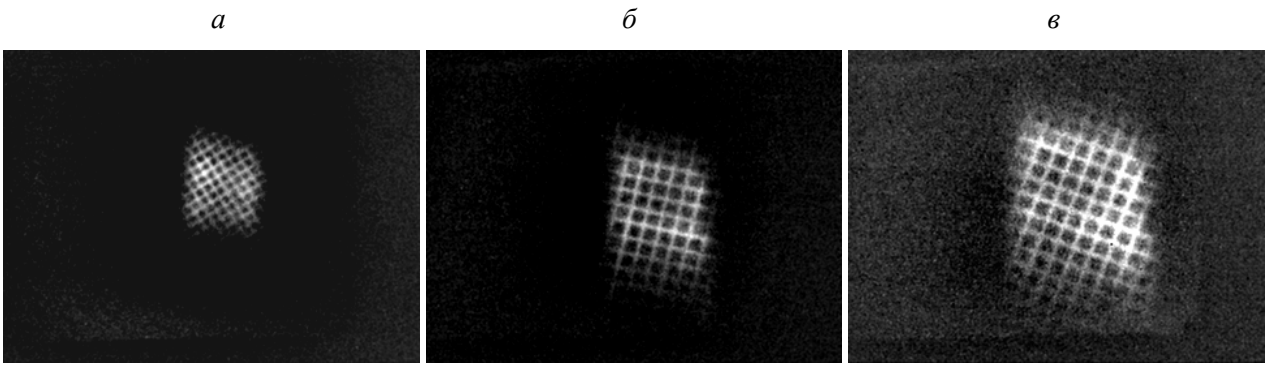

Рис. 3. Изображение золотой сетки № 1000, полученное с помощью рентгеновского микроскопа.
а: a =50,4 мм, b = 220 мм, M = 4,4; *б*: a =47 мм, b = 310 мм, M = 6,6; *в*: a =46,5 мм, b = 345 мм, M = 7,4

Также видно, что на указанных изображениях просматривается 8÷9 ячеек сетки, поэтому поле зрения микроскопа составляет около 200 мкм, что несколько меньше ожидаемого значения, которое равно приблизительно 300 мкм. Это может быть связано с тем, что рентгеновская трубка, которая использовалась в эксперименте, не обеспечивала засветку всего объекта, поскольку фокусное пятно рентгеновской трубки имеет несколько меньший размер, чем заявлено в паспорте трубки, вследствие длительной эксплуатации устройства. В то же время при данных размерах источника излучения поле зрения может быть увеличено до его ожидаемого значения за счет приближения фокусного пятна рентгеновской трубки к объекту. Однако сделать это в условиях описанного эксперимента проблематично из-за конструкционных особенностей защитного кожуха трубки.

Целесообразно сравнить изображение сетки № 1000, полученное с использованием линзы № 1 и показанное на рис. 3, с аналогичным, но полученным нами ранее с помощью линзы № 2, имеющей

большее фокусное расстояние [9]. Сравнение показывает, что детали изображения тестового объекта, полученного в данной работе, выражены значительно более отчетливо из-за использования рентгеновской линзы с более коротким фокусным расстоянием.

Таким образом, разработанный микроскоп может быть применен для получения изображения объектов с разрешением на уровне 3–4 микрона для фотонов с энергией 8 кэВ. Необходимо также отметить, что при увеличении интенсивности источника излучения и улучшении условий эксперимента, как отмечено выше, разрешение микроскопа может быть доведено до уровня, например, в 1 мкм путем реализации оптической схемы с большим увеличением M, например, равным 15. Таким источником излучения может быть рентгеновская трубка с вращающимся анодом, мощность которой в 10–15 раз выше, чем мощность трубки, которая была использована в описанных экспериментах.

Работа частично поддержана БРФФИ (проект ФО9МС-024).

1. Snigirev A., Kohn V., Snigireva I., Lengeler B.A. // Nature. 1996. Vol. 384. P. 49.
2. Аристов В.В., Шабельников Л.Г. // Успехи физ. наук. 2008. Т. 178 (1). С. 61.
3. Dudchik Yu.I., Kolchevsky N.N. // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. Vol. 421. P. 361.
4. Dudchik Yu.I., Kolchevsky N.N., Komarov F.F. et al. // Ibid. 2000. Vol. 454. P. 512.
5. Dudchik Yu.I., Kolchevsky N.N., Komarov F.F. et al. // Rev. Sci. Instr. 2004. Vol. 75. № 11. P. 651.
6. Дудчик Ю.И. // Вестн. БГУ. Сер. 1. 2008. № 2. С. 26.
7. Piestrup M.A., Gary C.K., Park H. et al. // Appl. Phys. Lett. 2005. Vol. 86. P. 131104-1.
8. Dudchik Yu.I., Komarov F.F., Piestrup M.A. et al. // Spectrochimica Acta Part B. 2007. Vol. 62. P. 598.
9. Дудчик Ю.И. // Вестн. БГУ. Сер. 1. 2007. № 1. С. 32.
10. Pantell R.H., Feinstein J., Beguiristain H.R. et al. // Applied Optics. 2003. Vol. 42. № 4. P. 719.

Поступила в редакцию 03.03.09.

Юрий Иванович Дудчик – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории элионики НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ.