

07;12

Исследование свойств полимерных рентгеновских линз

© Г. Павлов, I. Snigireva, A. Snigirev, T. Сагдуллин,
M. Schmidt

Институт проблем химической физики РАН,
Черноголовка, Московской обл., Россия
E-mail: pavl4411@yandex.ru
European synchrotron radiation facility, B.P. 220, 6 rue J. Horowitz,
F-38043 Grenoble, France
Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb,
Fachgebiet Mikro- und Feingeräte,
Straße des 17. Juni 135, D-10623 Berlin, Deutschland

Поступило в Редакцию 17 октября 2011 г.

Проведен экспериментальный анализ фокусирующих свойств и радиационной стойкости преломляющих полимерных рентгеновских линз на синхротроне ESRF. Для изготовления линз с аксиальной симметрией и параболическим профилем применен способ „впечатывания“ штампа прецизионной формы в фотоотверждаемый полимер. Измерения характеристик линз выполнены для энергии рентгеновского излучения в 9.9 keV с интенсивностью в 10^{13} ph(mm² · s)⁻¹. Обсуждаются результаты измерений.

Рентгеновские преломляющие линзы позволяют фокусировать рентгеновское излучение [1]. В последние 15 лет для их изготовления применялись различные материалы и технологии. Например, изготовлены и испытаны кремниевые и никелевые линзы [2], которые целесообразно использовать в диапазоне энергий рентгеновского излучения свыше 20 keV. При меньших энергиях данные линзы характеризуются сильным поглощением излучения и поэтому (даже при оптимальном дизайне) обеспечивают небольшое усиление интенсивности излучения в фокальном пятне. В то же время диапазон энергий рентгеновского излучения ниже 20 keV представляет значительный интерес для исследователей. Для изготовления линз в этом диапазоне целесообразно использовать полимерные материалы и легкие металлы (например, бериллий). Полимерный фоторезист SU-8 обладает достаточно малым S (атомный

номер химических элементов, образующих полимер) и, следовательно, сравнительно незначительным поглощением излучения при энергиях ниже 20 keV. Из данного материала методом глубокой рентгеновской литографии изготовлены планарные линзы, которые при испытаниях показали достаточную радиационную стойкость и низкую степень поглощения излучения [3]. Аналогичные линзы из ПММА показали низкую радиационную стойкость.

Линзы с аксиальной симметрией и параболическим профилем, являющиеся наиболее близким аналогом линз видимого диапазона, оказались более совершенным прибором для передачи рентгеновских изображений без аберраций по сравнению с линзами сферического профиля. Получение фокусного пятна с размерами, близкими к дифракционному пределу линзы, делает возможными и дифракционные исследования, позволяющие восстановить изображения нано-объектов. Для создания линз с аксиальной симметрией из бериллия разработан достаточно сложный и трудоемкий способ [4].

Вместе с тем качество линз, полученных перечисленными методами, не всегда является достаточным, поэтому сохраняется необходимость в разработке новых способов создания параболических линз с аксиальной симметрией, обладающих точной и стабильной формой преломляющей поверхности.

Преимуществами преломляющих линз с аксиальной симметрией и параболическим профилем осевой выемки (см. рис. 1), выполненных из полимера с памятью формы и протестированных в работе, в определенном диапазоне энергий рентгеновского излучения могут стать высокое качество линз при достижении необходимой степени однородности материала и заданной точности в конструкции линз, а также дешевизна и безопасность использования. Кроме того, единичные полимерные линзы, калиброванные по внешнему диаметру, удобно применить для создания составных линз, соосно располагая единичные линзы. Рассмотрим в этой связи основные требования к конструкции линз.

Как известно [1,2], показатель преломления материалов в рентгеновском диапазоне излучения имеет вид

$$n = 1 - \delta + i\beta. \quad (1)$$

Значения декремента преломления δ материалов в рентгеновском диапазоне малы по сравнению с единицей (обычно $10^{-6} - 10^{-5}$), мни-

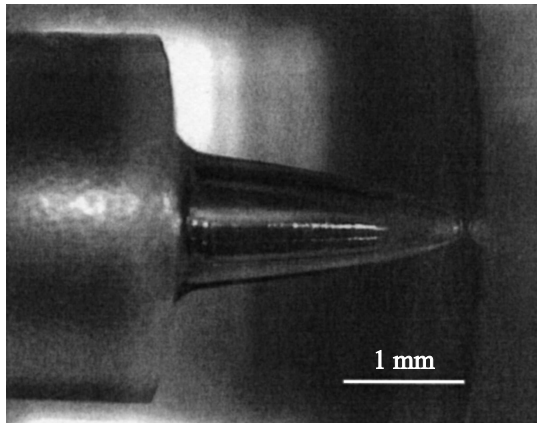


Рис. 1. Рентгеновская линза. Фотография линзы из полимера с памятью формы (выемка по оси в форме параболоида вращения).

мая часть показателя преломления связана с коэффициентом поглощения μ соотношением $\beta = \mu\lambda/4\pi$ (λ — длина волны излучения). Поскольку действительная часть показателя преломления < 1 , единичная преломляющая линза с аксиальной симметрией характеризуется осесимметричной выемкой в материале (полимере). Можно показать, что наиболее удачной формой выемки будет параболоид вращения. При этом фокусное расстояние двояковогнутой линзы определяется выражением $F = R/2\delta$ (R — радиус кривизны параболы в вершине выемки). Точность, с которой следует выдерживать форму выемки, определяется отсутствием сбоев фаз проходящей волны из-за случайных нарушений формы Δ и может быть оценена из соотношения $\Delta < \lambda/4\delta$. Для полимерных материалов точность формы должна быть порядка одного микрона, как это следует из данных [5]. В свою очередь диапазон энергий, в котором целесообразно использовать полимерные линзы, определяется параметром $N_0 = \delta/(2\pi\beta)$, т. е. отношение преломляющих и поглощающих свойств материала. Для полимерных материалов (средний атомный номер $Z_{eff} \leq 14$) данный параметр является высоким в диапазоне энергий 5–20 keV и превосходит значения данного параметра для других материалов. При более высоких энергиях качество полимерных линз ухудшается из-за увеличения роли процессов неупругого

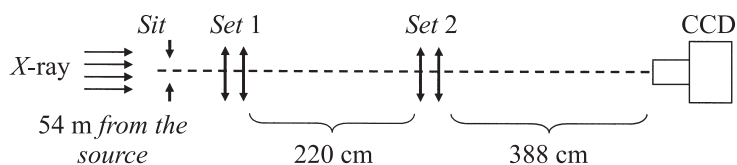


Рис. 2. Схема эксперимента по фокусировке излучения источника на станции ID06, ESRF.

рассеяния. Заметим, что размер фокального пятна, ограниченного дифракционным пределом линзы $\delta = \sqrt{(F\lambda)/(2\pi N_0)}$, также определяется параметром N_0 .

Очевидно, что из-за малого декремента преломления фокусное расстояние для единичной полимерной линзы может быть весьма значительным (до 10 м). Поэтому при практическом применении линз (особенно в лабораторных условиях) целесообразно использовать составные линзы—цепочки соосно расположенных N единичных линз. Фокусное расстояние составной линзы $F_N = F/N$ тем меньше для данного материала, чем меньше радиус кривизны в вершине выемки единичной линзы и чем больше N . Для реализации параметров, обеспечивающих необходимое качество при изготовлении полимерной линзы с аксиальной симметрией, применен одностадийный метод фронтальной фотополимеризации [6]. Данный метод позволяет одновременно выполнить фотосинтез полимера из фотополимеризующейся композиции (ФПК) и получить изделие заданной формы с высокой точностью. Принципиально сборка для изготовления линзы состоит из прозрачной для света оболочки (стеклянной трубки) и высокоточного штампа, выполненной из латуни „иглы“ в форме параболоида вращения (параметры параболоида: $z = (x^2 + y^2)/0.1$), который строго соосно вводится в трубку. Пустота в сборке заполняется ФПК, которая затем фотоотверждается. После завершения процесса отверждения полимера линза, не требующая дальнейшей обработки, и штамп извлекаются из оболочки. Для изготовления линз используется полимер с памятью формы.

Испытания полимерных линз с аксиальной симметрией проведены на синхротроне ESRF (г. Гренобль, Франция). Схема эксперимента представлена на рис. 2. Поток рентгеновского излучения в 9.9 keV со-

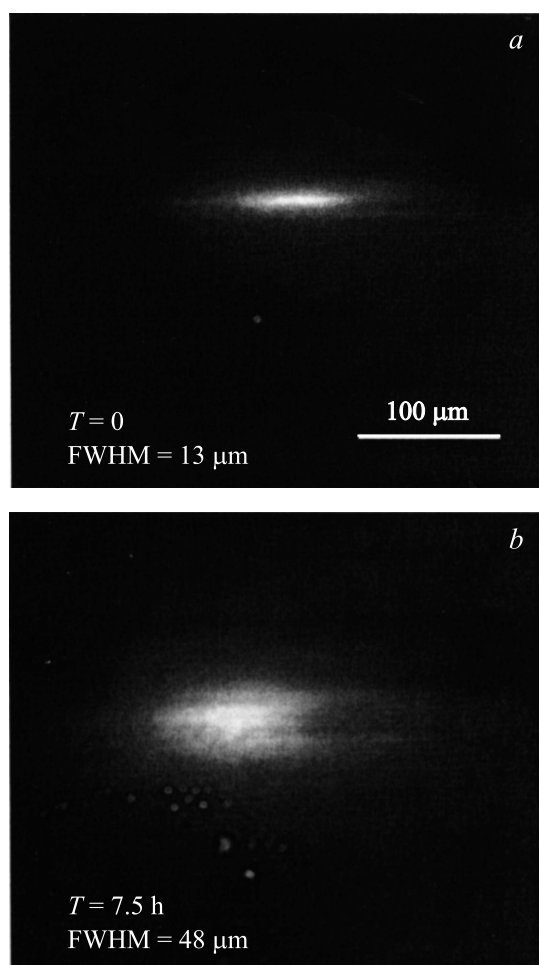


Рис. 3. Результаты тестов линз на радиационную стойкость. *a, b* — деградация изображения источника: изображение в начале эксперимента (*a*) и через 7.5 h (*b*); *c* — деградация линзы на примере линзы 5.82 (второй линзы в первом сете — см. рис. 2). Линза показана до эксперимента (рис. 1) и после 14 h экспонирования.

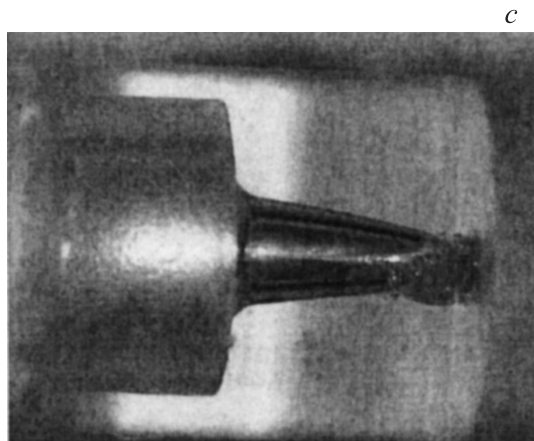


Рис. 3 (продолжение).

ставлял $10^{13} \text{ ph}(\text{mm}^2 \cdot \text{s})^{-1}$. Для фокусировки излучения использовались 4 полимерные линзы, установленные соосно с помощью гониометров. Сфокусированное излучение регистрировалось цифровым детектором. Результаты измерений изображения источника показали, что размер изображения составил $13 \mu\text{m}$, усиление излучения в фокальном пятне ~ 30 раз. Улучшение качества линз может быть достигнуто уменьшением толщины перегородки между вершиной выемки и свободной поверхностью.

Кроме фокусирующих свойств исследовалась стойкость линз к рентгеновскому излучению (рис. 3). Изображение источника фотографировалось каждые 5 min (до 50 кадра), а затем — каждые 10 min, также приведены фотографии линзы после испытаний (через 14 h). Из экспериментальных данных видно, что в течение первых часов облучения изображение источника практически не меняется и определяется конструктивными параметрами линз, затем изображение размывается, что вызвано разрушением полимерного материала. При этом в максимальной степени разрушены близкие к источнику линзы, поскольку они подвергались наибольшему воздействию излучения. Полимерный материал показал высокую стойкость к излучению, поскольку в течение первых 4 h испытаний практически не деградировал.

Таким образом, впервые предложен и реализован способ создания полимерных преломляющих линз с аксиальной симметрией и параболическим профилем методом „впечатывания“. Испытания показали хорошие фокусирующие свойства линз и высокую радиационную стойкость полимерного материала. Поэтому такие полимерные преломляющие линзы обладают достаточным ресурсом. Они могут быть использованы для различных задач рентгеновской диагностики на лабораторных источниках и на гораздо более мощных синхротронных источниках. На лабораторных источниках рентгеновского излучения данные линзы могут эксплуатироваться практически годами. Технология „впечатывания“ для изготовления единичных преломляющих полимерных линз позволяет получить качественные короткофокусные составные линзы, превосходящие по своим свойствам аналогичные устройства из бериллия.

Список литературы

- [1] *Snigirev A., Kohn V., Snigireva I., Lengeler B.* // Nature. 1996. V. 384. P. 49.
- [2] *Snigireva I., Snigirev A., Kuznetsov S. et al.* // 2001. Proceedings of SPIE. V. P. 4499. P. 64–74.
- [3] *Nazmov V., Shabelnikov L., Pantenburg F.-J. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2004. V. 217. P. 409.
- [4] *Lengeler B., Tummler J., Snigirev A., Snigireva I., Raven C.* // J. Appl. Phys. 1998. V. 84. P. 5855–5861.
- [5] *Сагдуллин Т.А., Шабельников Л.Г., Иржак Д.В.* // Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования. 2010. № 10. С. 1–7.
- [6] *Чесноков С.А., Треушников В.М., Чечет Ю.В., Черкасов В.К., Мамышева О.Н.* // ВМС А. 2008. V. 50. P. 456–466.
- [7] *Treushnikov V.M., Chesnokov S.A.* // J. Photochem. Photobiol. A 2008. V. 196. P. 201–209.