

Зеркальный рентгеновский микроскоп для исследования объектов, освещаемых излучением лазерной плазмы

И.А.Артюков, В.Е.Асадчиков*, А.В.Виноградов, Ю.С.Касьянов**, В.В.Кондратенко***, Р.В.Серов**, А.И.Федоренко***, С.А.Юлин***

На основе многослойных зеркал создана рентгенооптическая система для получения увеличенных изображений микрообъектов с разрешением ~ 0.2 мкм на длине волны 20 нм. Система состоит из лазерно-плазменного источника, конденсора рентгеновского излучения, объектива Шварцшильда с увеличением $20\times$, набора фильтров и детектора. Качество использованной рентгеновской оптики и точность юстировки компонентов системы позволили достичь разрешения ~ 0.2 мкм при использовании полной апертуры объектива. Экспозиция получается за одну вспышку Nd-лазера на второй гармонике с энергией импульса ~ 0.5 Дж и длительностью ~ 1.5 нс.

Введение

Важной задачей современной рентгеновской микроскопии является достижение пространственного разрешения масштаба длины волны излучения, что соответствует дифракционному пределу оптических систем с большой числовой апертурой. Если говорить о диапазоне длин волн 3–30 нм, то наиболее перспективными представляются системы, использующие рентгенооптические элементы двух типов: многослойные зеркала нормального падения и зонные пластинки. Особенно удобны слоистые зонные пластинки, изготовленные методом многослойного напыления на тонкую проволоку или нить, из которой затем вырезается зонная пластинка требуемой толщины [1–3].

По причинам физического и технологического характера рабочие площади этих оптических элементов различаются на шесть порядков. Диаметр зеркала составляет обычно 50–150 мм, а зонной пластинки – 100–300 мкм, поэтому естественно, что с каждым из указанных рентгенооптических элементов связана своя область применения и своя методика эксперимента. В то же время можно говорить об определенной конкуренции между ними в достижении наилучшего разрешения. Отметим, однако, что для ряда приложений не менее важное значение имеют и другие характеристики: поле зрения, эффективная площадь, фокусное расстояние и т. п.

В настоящей работе описан и исследован микроскоп Шварцшильда с увеличением $M \approx 21$ для области длин волн ~ 20 нм. Цель работы – развитие технологии изготовления компонентов рентгеновского микроскопа и его настройки, а также отработка методики эксперимента с точки зрения применения отражательной рентгеновской оптики для исследования несветящихся малых объектов, содержащих элементы субмикронных размеров.

Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, 117924, Москва, Ленинский пр-т, 53

*Институт кристаллографии РАН, 117333 Москва, Ленинский пр-т, 59

**Институт общей физики РАН, 117942 Москва, ул. Вавилова, 38

***Политехнический ин-т, Украина, 310002 Харьков, ул. Фрунзе, 21

Поступила в реакцию 31 января 1995 г.

1. Рентгеновский объектив Шварцшильда

Созданный микроскоп включает в себя лазерно-плазменный источник, конденсор рентгеновского излучения для освещения исследуемых образцов, объектив Шварцшильда, набор фильтров и детектор (рис.1). Объектив Шварцшильда – оптическая система, состоящая из двух зеркал сферической формы, которая при определенном выборе положения объекта на оптической оси позволяет скомпенсировать осевые aberrации третьего порядка.

Несмотря на то, что работы по рентгеновским объективам Шварцшильда ведутся уже свыше десяти лет [4–6], достигнутое пространственное разрешение все еще значительно больше используемой длины волны. Это связано с высокими требованиями к точности изготовления зеркал сферической формы, их юстировке, а также к качеству многослойных покрытий.

В настоящее время разработка и применение рентгеновских объективов Шварцшильда ведутся по нескольким направлениям. Во-первых, это сканирующие микроскопы [7–9], наиболее важной характеристикой которых является разрешение на оптической оси (размер пятна), составляющее порядка 0.1 мкм.

Во-вторых, объектив Шварцшильда служит составной частью большого числа разрабатываемых систем

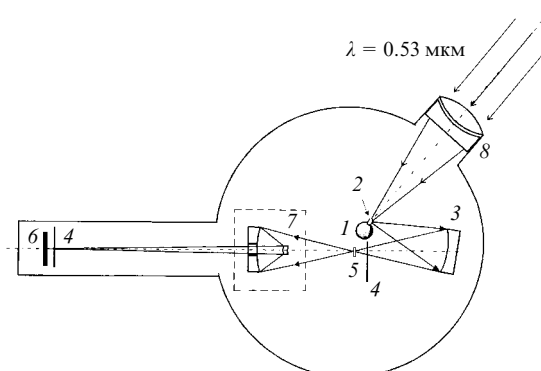


Рис.1. Схема рентгеновского микроскопа:

1 – массивная мишень из рения; 2 – лазерная плазма; 3 – конденсор; 4 – алюминиевые фильтры толщиной 0.4–0.5 мкм; 5 – тест-объект; 6 – фотопленка УФ-4; 7 – объектив Шварцшильда; 8 – фокусирующий объектив.

проекционной рентгеновской литографии [4, 10–16]. Помимо требуемого пространственного разрешения ~ 0.1 мкм в этом случае необходимо обеспечить $10^8 - 10^{10}$ разрешаемых элементов, поэтому важное значение имеет площадь поля зрения. Наконец, имеется сравнительно небольшое число работ, где объектив Шварцшильда используется в традиционной схеме оптического микроскопа – создает увеличенное изображение объекта на детекторе рентгеновского излучения. Объект может быть самосветящимся (лазерная плазма [17, 18]) либо может освещаться излучением синхротрона [19], рентгеновской трубки [20], рентгеновского лазера [21] или лазерной плазмы [22].

Приведем основные соотношения для объектива Шварцшильда. Если R_1 и R_2 – радиусы вогнутого и выпуклого зеркал с общим центром кривизны, то компенсация осевых aberrаций третьего порядка происходит тогда, когда объект расположен на расстоянии Z_0 от центра кривизны зеркал [23]:

$$Z_0 = \frac{R_1 R_2}{R_1 - R_2 + \sqrt{R_1 R_2}}.$$

При этом увеличение системы

$$M = \frac{R_1 - R_2 + \sqrt{R_1 R_2}}{R_1 - R_2 - \sqrt{R_1 R_2}}.$$

В параксиальном приближении концентрический объектив Шварцшильда соответствует тонкой линзе, расположенной в общем центре кривизны зеркал и имеющей фокусное расстояние

$$F = -\frac{R_1 R_2}{2(R_1 - R_2)}.$$

В настоящей работе использовался объектив Шварцшильда со следующими параметрами: увеличение $M \approx 21$, радиус кривизны большого зеркала $R_1 = 100$ мм, диаметр светового окна $D_1 = 50$ мм, радиус кривизны малого зеркала $R_2 = 35$ мм, его диаметр $D_2 = 10.6$ мм, числовая апертура $N_a = 0.19$, фокусное расстояние $F = 26.9$ мм. Подложки для сферических зеркал были изготовлены из плавленого кварца КУ-1. Среднеквадратичное отклонение формы подложек от сферической по всей рабочей поверхности не превышало ~ 5 нм, что соответствовало точности использовавшейся измерительной аппаратуры. Остаточные поперечные aberrации δ на оси, как показали расчеты с помощью компьютерной программы «SURF» [22], составляют ~ 0.06 мкм в концентрической схеме Шварцшильда.

Многослойное Mo–Si-покрытие было нанесено методом прямого магнетронного распыления [24] одновременно на оба зеркала объектива Шварцшильда и конденсор. Для повышения отражательной способности зеркал верхним слоем всех оптических элементов являлся молибден, который, в свою очередь, для предотвращения временной деградации закрывался тонким (1.5–2.0 нм) слоем кремния [25]. Период нанесенного покрытия определялся по результатам измерения кривой отражения при скользящем падении на длине волны линии K_α меди от плоского зеркала-свидетеля, которое изготавливалось одновременно со сферическими зеркалами. Период покрытия $d = 9.89$ нм, доля толщины слоя Mo в периоде равнялась ~ 0.34 , а число периодов – 20.

На рабочей длине волны $\lambda \sim 20$ нм использованная нами технология обеспечивает обычно коэффициент от-

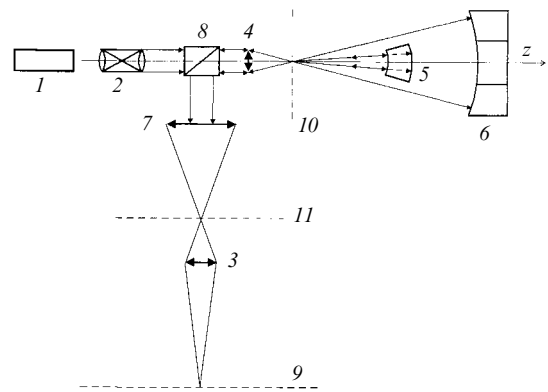


Рис.2. Схема юстировки объектива Шварцшильда:

1 – He–Ne-лазер; 2 – телескоп; 3, 4 – микрообъективы; 5, 6 – зеркала объектива Шварцшильда; 7 – длиннофокусный объектив; 8 – светоделительный куб; 9 – экран; 10 – фокальная плоскость; 11 – плоскость отображения.

ражения сферических зеркал 20–25 % [26]. Для компонентов данного объектива и конденсора специальных измерений отражательной способности не проводилось.

2. Оптическая юстировка объектива

Юстировка объектива Шварцшильда обычно требует вспомогательной оптики высокого качества с относительно большой апертурой (по крайней мере, не менее ~ 0.2). Особая трудность возникает при юстировке центров кривизны зеркал, точность совмещения которых в плоскости, перпендикулярной оптической оси системы, должна быть не хуже ~ 1 мкм. В данной работе нами предлагается схема оптической юстировки объектива Шварцшильда, в котором малое зеркало выполнено в виде мениска.

Расширенный и коллимированный пучок (рис.2) He–Ne-лазера фокусируется микрообъективом 4 в плоскости 10 и, отражаясь от сферических зеркал 5 и 6, попадает на экран 9. Фокальная плоскость 10 с помощью микрообъектива 4, светоделительного куба 3 и длиннофокусного объектива 7 отображается на плоскость 11, а затем микрообъективом 8 на экран 9. Общее увеличение системы – около 5000. Если центры кривизны зеркал находятся вблизи плоскости 10, то на экране 9 видны, вообще говоря, три фокальных распределения отраженного от зеркал 5 и 6 лазерного излучения. Перемещая зеркало 5 и (или) 6, можно совместить центры кривизны обоих зеркал. Погрешность совмещения этих центров в фокальной плоскости в данном случае составляет $\sim 0.2-0.5$ мкм. Вдоль оптической оси погрешность совмещения определяется длиной каустики малого зеркала и составляет $\sim 10-15$ мкм.

Оба зеркала крепились в металлическом корпусе: большое зеркало было неподвижно, малое имело две поступательные степени свободы в плоскости, перпендикулярной оптической оси объектива. Совмещение центров кривизны зеркал по направлению оптической оси осуществлялось с помощью калиброванных колец, помещаемых внутрь корпуса объектива.

3. Схема эксперимента и обсуждение

Для проверки работы объектива Шварцшильда в его рабочем диапазоне ($\lambda \approx 20$ нм) использовалась ранее

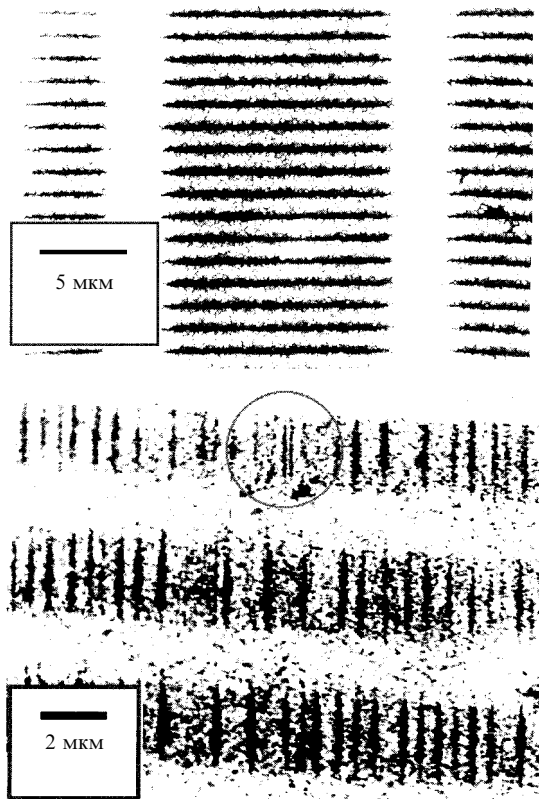


Рис.3. Рентгеновские изображения золотых решеток с периодом 1.4 (а) и 0.2 мкм (б); рис.3,б получен после частичного устранения искажений, вносимых пленкой.

применяемая нами методика [22] (см.рис.1). Источником рентгеновского излучения служила плазма, образованная в результате фокусировки на массивную мишень излучения лазера с длиной волны $\lambda_0 = 0.53$ мкм, длительностью импульса 1.5 нс и максимальной энергией импульса до 20 Дж. В качестве тест-объектов для определения пространственного разрешения объектива применялись две золотые пропускающие решетки: одна – с периодом 1.4 мкм и шириной щели 0.5 мкм, другая – с периодом 0.2 мкм и шириной щели менее 0.1 мкм.

Предварительная настройка на резкость изображения тест-объектов проводилась в видимом диапазоне. Более точная настройка в рентгеновском диапазоне осуществлялась перемещением приемной кассеты вдоль оптической оси системы после каждой экспозиции при неподвижном тест-объекте. Конструкция приемной кассеты позволяла получать до восьми изображений на одной фотопленке без нарушения вакуума. Размер одного изображения составлял 3×3 мм и определялся размером алюминиевого фильтра 4 (см. рис.1), находящегося непосредственно перед фотопленкой. Высокая яркость лазерно-плазменного источника [27] обеспечивала получение изображений с нормальным почернением за одну лазерную вспышку с энергией 0.5 Дж.

На рис.3 приведены фотографии полученных изображений тест-объектов. На рис.3,б отчетливо видны дефекты изготовления решетки с периодом 0.2 мкм. Нерегулярность решетки была подтверждена независимо с помощью электронной микроскопии. Таким образом, рентгеновская микроскопия может быть использована для контроля качества образцов на субмикронном уровне. При этом толщина объекта может быть значительно

больше, чем в случае электронной микроскопии, поскольку длина пробега рентгеновского фотона в веществе значительно больше глубины проникновения электронов.

Следует отметить, что в отличие от предыдущих экспериментов [22] высокое качество зеркал и лучшая юстировка позволили работать с полной апертурой объектива (т.е. с числовой апертурой ~ 0.2) и достичь пространственного разрешения 0.2 мкм (рис.3,б), которое, возможно, ограничивается размером зерна применяемой нами фотопленки УФ-4.

В заключение авторы благодарят академика К.А.Валиева (Физико-технологический институт РАН, Москва) за стимулирующие дискуссии. Авторы благодарны М.Л.Шаттенбургу (Массачусетский технологический институт, США), предоставившему пропускающие решетки, и Д.Л.Загорскому (Институт кристаллографии РАН, Москва) за проведение исследований на электронном микроскопе. Мы благодарим также АОЗТ «Винур» за поддержку.

Работа финансируется Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 95-02-04908-а).

1. Rudolph D., Niemann B., Schmahl G. *Proc. SPIE*, **316**, 103 (1982).
2. Bionta R.M., Skulina K.M., Weinberg J. *Appl. Phys. Letts*, **64**, 945 (1994).
3. Hilkenbach R. In: *X-ray Microscopy III* (Berlin, Springer, 1992, p.67).
4. Tanaka K.A., Kado M., Kodama R., Ohtani M., Kitamoto S., Yamanaka T., Yamashita K., Nakai S. *Proc. SPIE*, **1140**, 502 (1989).
5. Lovas I., Santy W., Spiller E., Tibbetts R., Wilczynski J. *Proc. SPIE*, **316**, 90 (1981).
6. Chauvineau J.P., Marioge J.P., Bridou F., Tissot G., Valiergue L., Bonino B. *Proc. SPIE*, **733**, 301 (1986).
7. Trail J., Byer R. *Optics Letts*, **14**, 539 (1989).
8. Ng W., Ray-Chauhuri A., Liang S., Welnak J., Wallace J., Singh S., Capasso C., Margaritondo G., Underwood J., Kortright J., Perera R. *Proc. SPIE*, **1741**, 296 (1992).
9. Spiller E. In: *X-ray Microscopy* (Berlin, Springer-Verlag, 1984, p.226).
10. Kinoshita H., Kurihara K., Ishii Y., Torii Y. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **7**, 1648 (1989).
11. Kurihara K., Kinoshita H., Mizota T., Haga T., Torii Y. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **9**, 3189 (1991).
12. Hawryluk A.M., Seppala L.G. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **6**, 2162 (1988).
13. Berreman D.W., Bjorkholm J.E., Becker M., Eichner L., Freeman R.R., Jewell T.E., Mansfield W.M., MacDowell A.A., O'Malley M.L., Raab E.L., Silfvast W.T., Szeto L.H., Tennant D.M., Waskiewicz W.K., White D.L., Windt D.L., Wood O.R. *Appl. Phys. Letts*, **56**, 2180 (1990).
14. Jewell T.E., Rodgers J.M., Thompson K.P. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **8**, 1519 (1990).
15. Bijkerk F., Shmaenok L., Louis E., van Honk A., van der Wiel M.J., Platonov Yu., Shevelko A., Mitrofanov A., Voß F., Desor R., Frowein H., Nikolaus B. *Proc. SPIE*, **2015**, 128 (1994).
16. Tichenor D.A., Kubiak G.D., Malinowski M.E., Stulen R.H., Haney S.J., Berger K.W., Brown L.A., Sweatt W.C., Bjorkholm J.E., Freeman R.R., Himel M.D., MacDowell A.A., Tennant D.M., Wood O.R., Bokor J., Jewell T.E., Mansfield W.M., Waskiewicz W.K., White D.L., Windt D.L. *Appl. Optics*, **32**, 7068 (1993).
17. Seeley J.F., Holland J.E., Giasson J.V. *Appl. Optics*, **32**, 6294 (1993).
18. Kado M., Tanaka K.A., Kodama R., Yamanaka T., Nakai S., Yamashita K., Ohtani M., Kitamoto S. *Optics Letts*, **16**(2), 109 (1991).
19. Masui S., Mochimaru S., Watanabe N., Horikawa Y., Yamada H., Kihara H. *Proc. SPIE*, **1741**, 94 (1992).
20. Murakami K., Oshino T., Nakamura H., Ohtani M., Nagata H. *Appl. Optics*, **32**, 7057 (1993).
21. DiCicco D.S., Kim D., Rosser R., Suckewer S. *Optics Letts*, **17**(2), 157 (1992).
22. Artyukov I.A., Fedorenko A.I., Kondratenko V.V., Yulin S.A.,

- Vinogradov A.V. *Optics Comms*, **102**, 401 (1993).
23. Hoover R.B., Shealy D.L., Gabardi D.R., Walker A.B.C., Lindblom J.F., Barbee T.W. *Proc. SPIE*, **984**, 234 (1988).
 24. Колачевский Н.Н., Кондратенко В.В., Митропольский М.М., Рагозин Е.Н., Федоренко А.И., Юлин С.А. *Кр. сообщ. физ. ФИАН*, № 7, 51 (1992).
 25. *Center For X-ray Optics: 1992* (Lawrence Berkeley Laboratory, 1993, LBL-34462, UC-411).
 26. Vinogradov A.V., Kozhevnikov I.V., Levashov V.E., Sagitov S.I., Chirkov V.A., Kondratenko V.V., Mikhailov I.F., Fedorenko A.I., Lyakhovskaya I.I. *Proc. SPIE*, **1140**, 530 (1989).
 27. Арцимович В.Л., Гапонов С.В., Касьянов Ю.С., Лускин Б.М., Салашенко Н.Н., Собельман И.И., Шевелько А.П. *Письма в ЖЭТФ*, **46**, 311 (1987).

I.A.Artiyukov, V.E.Asadchikov, A.V.Vinogradov, Yu.S.Kas'janov, V.V.Kondratenko, R.V.Serov, A.I.Fedorenko, S.A.Yulin. Mirror x-ray microscope for the investigation of objects illuminated by laser-plasma radiation.

Multilayer windows were used in an x-ray optical system which formed magnified images of microscopic objects with a resolution of $\sim 0.2 \mu\text{m}$ at the wavelength 20 nm. The system consisted of a laser-plasma source, an x-ray condenser, a Schwarzschild objective with a magnification 20, a set of filters, and a detector. The quality of the x-ray optics and the precision of alignment of the system components made it possible to attain a resolution of $\sim 0.2 \mu\text{m}$ when the full aperture of the objective was used. A single shot in the form of the second harmonic of an Nd laser, generating pulses of $\sim 0.5 \text{ J}$ energy and $\sim 1.5 \text{ ns}$ duration, was sufficient for exposure.