

07;12

Получение рентгеновских теневых изображений с применением высокоразрешающей увеличивающей изображающей оптики Кумахова

© А.Ю. Романов, В.Н. Черник

Институт рентгеновской оптики, Москва
E-mail: androm2@yandex.ru

Поступило в Редакцию 27 апреля 2004 г.

Реализована методика получения рентгеновских теневых изображений на основе высокоразрешающей конусообразной поликапиллярной структуры оптики Кумахова, развивающая принципиально новое направление в рентгеновской микроскопии. Данная методика не требует применения дорогостоящих микрофокусных рентгеновских источников, традиционно применяемых для этих целей. Современные коммерческие рентгеновские визуализирующие системы имеют разрешение на уровне 5–6 μm . Нами в этой работе получено разрешение на уровне 1-го μm .

Существующие рентгеновские теневые микроскопы изображающего типа требуют для получения изображений с микронным разрешением применения дорогостоящих рентгеновских источников [1,2], реализуемых обычно на основе синхротронов либо микрофокусных рентгеновских трубок, что влечет за собой усложнение и удорожание конструкции микроскопа. Выходом из данной ситуации может быть применение в составе микроскопа рентгенооптических систем оптики Кумахова [3–7]. Поликапиллярная оптика дает улучшение контрастности и повышение разрешения.

В отличие от проекционной схемы увеличения в воздушном зазоре, где разрешение определяется размерами источника, в схеме с поликапиллярной оптикой оно определяется в основном входными размерами капилляра. Поликапиллярные структуры в оптической схеме просвечивающего микроскопа позволяют получать рентгеновские изображения с разрешением на уровне 2–3 входных диаметров канала [5,6].

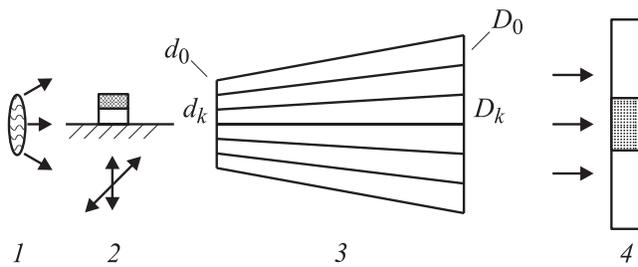


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — фокусное пятно трубки, 2 — тест-объект, 3 — конусообразная поликапиллярная структура, 4 — рентгеновский визуализатор изображений.

Со времени первых экспериментальных работ по поликапиллярной рентгеновской микроскопии [5,6] уровень технологии производства поликапиллярных структур значительно вырос, что позволяет существенно повысить характеристики схем микроскопии на основе оптики Кумахова. Таким образом, целесообразны работы по приложению современной оптики Кумахова к рентгеновской микроскопии. Экспериментальная реализация возможности использования высокоразрешающей поликапиллярной системы — конуса была осуществлена в данной работе.

Оптическая схема эксперимента состоит из источника, объекта, поликапиллярного конуса, визуализатора рентгеновских изображений (рис. 1). Принцип действия данной схемы микроскопии основан на проецировании теневого рентгеновского изображения объекта на вход поликапиллярного конуса с большим отношением входного d_k и выходного D_k диаметров $M_k = D_k/d_k = 5-15$ раз. Решеткой входных отверстий поликапиллярной структуры изображение разбивается на элементы, т.е. формируется растр. Каждый капилляр захватывает элемент изображения и перемещает его с увеличением к детектору (фото-пленка, рентгеновский визуализатор). Благодаря этому обеспечивается первая ступень увеличения — в рентгеновском диапазоне. Увеличение подобных систем определяется отношением: $M_0 = D_0/d_0$, где d_0 — диаметр капилляра на входе системы; D_0 — диаметр капилляра на выходе, причем $M_0 = M_k \equiv M$.

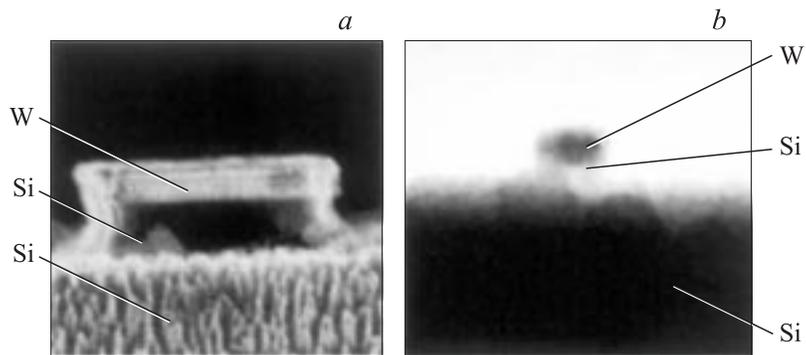


Рис. 2. Изображение тест-объекта: *a* — в электронном микроскопе, *b* — рентгеновское теневое изображение.

Функции конуса состоят в формировании и увеличении изображения, повышении разрешения, увеличении контраста. Длина L и увеличение M поликапиллярного конуса связаны с фокусным расстоянием f — расстоянием между фокусом рентгеновской трубки и входом в конус — следующим выражением: $f = L/(M - 1)$. Например, для $M = 10$ и $L = 45 \text{ mm}$ $f = 5 \text{ mm}$. Размер площади обозрения определяется входной площадью конуса.

К настоящему времени уровень технологии в институте рентгеновской оптики (ИРО) позволяет получать поликапиллярные конусы с входным диаметром канала $0.15 \mu\text{m}$ и отношением входного и выходного диаметров 10–15.

В эксперименте используется конус с размером входного канала $d_0 \approx 0.3 \mu\text{m}$ и выходного $D_0 \approx 4.5 \mu\text{m}$. Входной диаметр всей сборки $d_k = 0.3 \text{ mm}$, выходной — $D_k = 4.5 \text{ mm}$. Таким образом, так называемая перетяжка конуса $M_k = 15$. Такая структура позволяет получать увеличение в рентгенооптическом тракте $M = 15$. Ранее, в работе [6] использовалась коническая структура с параметрами: $d_0 = 0.8 \mu\text{m}$, $D_0 = 4 \mu\text{m}$, $L = 23 \text{ mm}$, $M = 5$.

Источником служит микрофокусная трубка БС-13 протрельного типа с медным анодом и электромагнитной фокусировкой в режиме 2.5 W, 40 kV. Эффективный размер фокусного пятна трубки — около $200 \mu\text{m}$. При этом экспозиция составляет 10 с.

После преобразования рентгеновского изображения выхода конуса на сцинтилляционном экране световое изображение подвергается дальнейшему увеличению микробъективом в световом тракте, усилению яркости в электронно-оптическом преобразователе (ЭОП) и регистрируется ПЗС-камерой (прибором с зарядовой связью) в виде цифрового изображения. Суммарная разрешающая способность визуализирующего устройства, приведенная с плоскости люминофора, составляет $\sim 5 \mu\text{m}$.

Видеосигнал с ПЗС-камеры захватывается стандартной платой персонального компьютера. Обработка изображения производится программой с попиксельным накоплением с усреднением и делением изображений до получения на мониторе компьютера конечного увеличенного изображения.

Получены рентгеновские теневые изображения тест-объекта (рис. 2), представляющего собой вольфрамовую пластинку высотой $2 \mu\text{m}$ на кремниевом пьедестале высотой $2.5 \mu\text{m}$, возвышающемся над толстой кремниевой пластиной. Кремниевый пьедестал по направлению распространения рентгеновского излучения имеет гораздо меньшую толщину ($\sim 10 \mu\text{m}$), поэтому на рентгеновском изображении пьедестал создает гораздо меньший контраст, чем кремниевая пластина, на которой он находится ($\sim 0.5 \text{mm}$).

Толщина вольфрама по направлению хода лучей составляет примерно $10 \mu\text{m}$, что достаточно для получения хорошего контраста. Как видно, отчетливо разрешаются детали микронных размеров, что соответствует теоретическим оценкам разрешения $R = 3$, $d_0 = 0.9 \mu\text{m}$.

На изображении видна сетка, образованная поликапиллярными стенками. Разрабатывается методика устранения данной сетки программными средствами.

В работе [5] были получены изображения двух золотых проволок диаметром $10 \mu\text{m}$ с зазором между ними в $3 \mu\text{m}$. Однако из рассуждений, приводимых в данной работе, вытекает, что реальное разрешение в этом случае составляет $1.5\text{--}2 \mu\text{m}$. В нашей же работе действительно получены изображения тест-объекта с микронным разрешением.

Полученные результаты позволяют надеяться на возможность дальнейшего повышения разрешения до величины порядка $0.1 \mu\text{m}$ путем как оптимизации оптической схемы, так и улучшения характеристик отдельных компонентов, в первую очередь — поликапиллярного конуса.

Выражаем благодарность проф. М.А. Кумахову за ценные замечания.

Список литературы

- [1] *Schoer C.G., Meyer J., Kuhlmann M. et al. // Appl. Phys. Lett.* 2002. V. 81. N 8. С. 1527–1529.
- [2] *Mayo S.C., Miller P.R., Wilkins S.W., Davis T.J. et al. // Journal of microscopy.* 2002. V. 207. P. 79–96.
- [3] *Kimakhov M.A., Komarov F.F. // Phys. Reports.* 1990. V. 191. P. 290–350.
- [4] *Дабегов С.Б. // УФН.* 2003. Т. 173. № 10. С. 1083–1106.
- [5] *Nikitin A.N., Ibraimov N.S., Nikitina S.V. // Proceedings of SPIE.* 1996. V. 2859. P. 117–124.
- [6] *Nikitin A.N. // Proceedings of SPIE.* 1997. V. 3115. P. 117–124.
- [7] *Романов А.Ю. // Измерительная техника.* 2004. № 7.