

02;12

Сканирующая рентгеновская микроскопия на основе оптики Кумахова и растрового источника

© В.Д. Гелевер, А.Ю. Романов

Институт рентгеновской оптики, Москва

E-mail: androm2@yandex.ru

Поступило в Редакцию 5 августа 2004 г.

Впервые реализована схема сканирующей рентгеновской микроскопии на основе цилиндрической поликапиллярной структуры оптики Кумахова и растрового микрофокусного рентгеновского источника. Рентгеновский сканирующий микропучок образуется посредством сканирования фокусным пятном по площади мишени прострельной рентгеновской трубки с установленной на выходе трубки цилиндрической поликапиллярной структурой.

Схема образования изображения в рентгеновской сканирующей микроскопии реализуется двумя способами: либо путем перемещения объекта — объектное сканирование, либо рентгеновского пучка — лучевое сканирование. Объектное сканирование осуществляется на основе механических перемещений объекта. Данный метод применяется с массивными рентгеновскими источниками, например синхротронными. Получение рентгеновского сканирующего микропучка возможно перемещением источника, что реализуется на основе лабораторных источников. Новым методом организации данной схемы микроскопии является применение оптики Кумахова [1–4]. В случае применения в качестве источников рентгеновских трубок организация лучевого сканирования возможна посредством перемещений источника относительно неподвижной цилиндрической поликапиллярной оптики посредством электронно-лучевого сканирования фокусного пятна по мишени рентгеновской трубки.

В работах [5,6] описан близкий идейно способ визуализации рентгеновских топографических изображений монокристаллов, основанный на использовании матриц параллельных коллимирующих капилляров в сочетании с растровой рентгеновской трубкой для образования

слаборасходящихся микропучков. В работе [7] описана конструкция такой трубки, разработанная для системы визуализации рентгеновских микроскопических картин. Кроме того, данный подход применялся и для реализации абсорбционной дефектоскопии с установкой капилляров после образца [8]. Благодаря поэлементной передаче изображения удается значительно повысить чувствительность системы и избежать присущих другим методам взаимных механических перемещений элементов установки, что является ценным эксплуатационным качеством. Но применяемые интенсивности в пучках в данных работах невелики по причине применения оптики и рентгеновского источника с малой светосилой, что ограничивает возможности данных методов.

Однако во всех описанных системах поликапиллярная составляющая использовалась как коллиматор пучков рентгеновского излучения и не рассматривалась возможность передачи рентгеновского излучения посредством полного внешнего отражения (ПВО) от внутренних стенок капилляров.

Развитием подхода с применением микрокапиллярных коллимирующихборок является реализация сканирующей рентгеновской микроскопии с применением современной оптики Кумахова. Оптика Кумахова совместно с микрофокусным источником позволяет получать более интенсивные и меньшего сечения квазипараллельные сканирующие пучки за счет использования эффекта ПВО от внутренних стенок поликапилляров [1,2]. Уменьшение диаметра канала прохождения рентгеновских лучей и использование стеклянных стенок в качестве отражающей поверхности приводят к многократному внешнему отражению и значительно увеличивают удельную интенсивность сформированного пучка рентгеновского излучения.

В [1,2] в лабораторных условиях получены интенсивные квазипараллельные рентгеновские микропучки диаметром порядка $10\ \mu\text{m}$ с плотностью потока излучения порядка 10^{10} фотонов/(с·мм²) и расходимостью несколько миллирадиан, что близко к параметрам синхротронного излучения. В качестве источника использовался микрофокусный рентгеновский источник на основе трубки прострельного типа. Преобразователем расходящегося пучка в квазипараллельный служила цилиндрическая поликапиллярная структура оптики Кумахова с микрометровым диаметром канала. Развитием и приложением данного метода получения интенсивных микропучков является реализация сканирующей рентгеновской микроскопии.

Кроме того, в последние годы значительно возросла вычислительная мощность персональных компьютеров, вследствие чего все функции по управлению электронно-зондовым прибором, контролю текущих параметров и анализу экспериментальных данных можно осуществлять в реальном времени [9]. Также значительно повысились возможности по компьютерной обработке изображений, что дает богатые возможности более качественного извлечения информации из экспериментальных данных.

Целью данной работы является экспериментальная реализация сканирующей рентгеновской микроскопии на основе квазипараллельных рентгеновских микропучков высокой интенсивности с использованием вышеупомянутых рентгеновской трубки и цилиндрического поликапиллярного оптического элемента.

Принцип описываемого метода состоит в следующем. Цилиндрическая поликапиллярная структура приближается максимально близко к аноду микрофокусной растровой рентгеновской трубки. На выходе поликапиллярной системы получаем интенсивный квазипараллельный сканирующий микропучок, содержащий в сечении изображение источника [3]. Объект исследования устанавливается максимально близко к выходу поликапиллярной структуры. Далее по оптической оси следует детектор.

Оптическая схема эксперимента показана на рис. 1, где f_1 — приближение к фокусному пятну трубки, f_2 — приближение объекта к столбику, d_1 — входной диаметр (диаметр „засветки“), d_2 — диаметр пучка на объекте. Данная оптическая схема позволяет получать пучки на объекте с диаметром поперечного сечения d_2 , определяемым размером эффективного фокусного пятна трубки d_0 , размером капилляра d_3 , расстоянием между фокусным пятном до входного торца поликапиллярной структуры f_1 , и расстоянием до объекта от выходного торца f_2 :

$$d_2 = d_0 + 2d_3 + 2f_1\theta_c + 2\theta_c f_2,$$

где θ_c — критический угол полного внешнего отражения рентгеновского излучения от внутренних капиллярных стенок.

В составе рентгеновского источника используется рентгеновская прострельная трубка БС-11. Фокусирование и отклонение электронного пучка осуществляется системой магнитных линз. Образование растрового изображения осуществляется растровой видеосистемой на основе

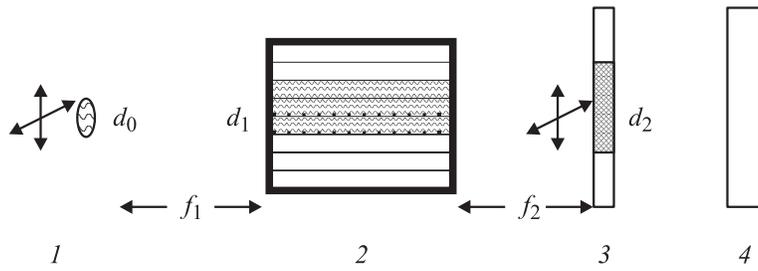


Рис. 1. Схема сканирующей рентгеновской микроскопии с применением цилиндрической поликапиллярной структуры и растрового микрофокусного источника: 1 — фокусное пятно трубки, 2 — поликапиллярная структура, 3 — объект, 4 — детектор.

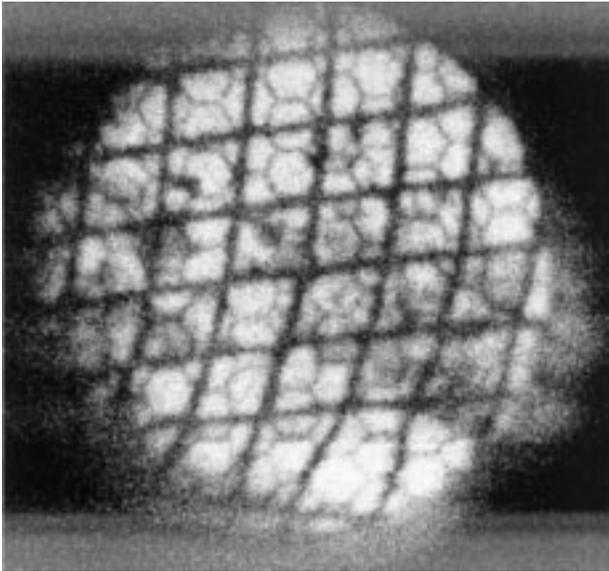


Рис. 2. Изображение тест-объекта, полученное в схеме сканирующей рентгеновской микроскопии с применением цилиндрической поликапиллярной структуры и растрового микрофокусного источника.

управления электронным пучком рентгеновской трубки посредством программного изменения токов отклоняющих катушек с синхронной обработкой сигнала с детектора, формированием растрового изображения и отображением его на мониторе компьютера.

Толщина бериллиевого окна трубки приблизительно $200\ \mu\text{m}$. Конструктивно допускается возможность предельного приближения к аноду. В эксперименте использовалась трубка с медным анодом. Установленное напряжение на трубке составляло $25\ \text{keV}$, ток — $100\ \mu\text{A}$. Применяемый поликапиллярный столбик имеет длину $1\ \text{cm}$, диаметр капилляра и всей сборки $5\ \mu\text{m}$ и $5\ \text{mm}$ соответственно.

Таким образом, в условиях лаборатории получен сканирующий микроручок с диаметром поперечного сечения на объекте порядка $10\ \mu\text{m}$ и плотностью потока излучения на уровне 10^{10} фотон/(с · мм²), позволяющий реализовать схему сканирующей рентгеновской микрокопии.

Пример полученных растровых рентгеновских изображений тест-объекта — сетки из медной проволоки диаметром $50\ \mu\text{m}$ приведен на рис. 2. На итоговом изображении помимо тест-объекта отображается также структура оптической системы: область анода, распределение яркости по его площади; поликапиллярные стенки, не пропускающие рентгеновское излучение, и распределение пропускания по рабочей площади поликапиллярной системы.

Несомненно, что посредством дополнительной оптимизации схемы и компонентов предложенного метода можно еще значительно улучшить качество получаемых изображений и тем самым расширить диапазон исследуемых объектов.

Выражаем благодарность за плодотворные дискуссии и ценные замечания по данной работе Н.С. Ибраимову и А.В. Лютцау.

Список литературы

- [1] Романов А.Ю., Дмитриев И.В. // Мат. сов. „Рентгеновская оптика“. Н. Новгород, 2004. С. 221–225.
- [2] Романов А.Ю., Дмитриев И.В. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 18. С. 65–69.
- [3] Романов А.Ю. // Измерительная техника. 2004. № 7. С. 20–22.
- [4] Романов А.Ю., Дмитриев И.В. // Инженерная физика. 2004. № 1. С. 43–47.

- [5] *Беляев Б.Ф., Глушанок Ю.Б., Гуцин В.А.* и др. // Аппаратура и методы рентгеновского анализа: Сб. ст. ЛНПО „Буревестник“. Вып. 24. 1980. С. 137–141.
- [6] *Efanov V.P., Komyak N.I., Luttsau V.G., Rabodsei N.V.* // USA Patent. 1974. № 3, 833, 810.
- [7] *Гуцин В.А., Ефанов В.П., Иванов С.А., Лютцау В.Г.* // ПТЭ. 1978. № 6. С. 152–153.
- [8] *Ефанов В.П., Комяк Н.И., Лютцау В.Г.* // ПТЭ. 1975. № 1. С. 217–219.
- [9] *Демин Ю.А., Демченко Е.Л., Ильин В.А.* и др. // Научное приборостроение. 1999. Т. 9. № 2. С. 14–21.