

02;12

Получение интенсивных квазипараллельных рентгеновских микропучков с использованием цилиндрической поликапиллярной структуры

© А.Ю. Романов, И.В. Дмитриев

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

Поступило в Редакцию 24 марта 2004 г.

В лабораторных условиях получены интенсивные квазипараллельные рентгеновские микропучки с плотностью потока излучения порядка 10^{10} ph/(s · mm²) 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.

В ряде задач рентгеновского микроанализа требуется получение микропучков высокой интенсивности. Кроме того, ряд приложений накладывает ограничения на расходимость излучения в пучке [1]. Проблема получения пучков рентгеновского излучения высоких плотностей в лабораторных условиях стоит остро в связи с малодоступностью и дороговизной высокомоощных источников, таких как синхротроны и рентгеновские трубки с вращающимся анодом и водяным охлаждением. Дополнительное требование на квазипараллельность микропучка еще более усложняет эту задачу. Выходом из такого положения может служить применение рентгенооптических систем поликапиллярной оптики Кумахова совместно с обычными рентгеновскими трубками прострельного и зеркального типа, что позволяет получить необходимые параметры микропучков даже на основе обычных маломощных трубок [2–4].

Возможность использования для получения квазипараллельных пучков полулинз Кумахова хорошо известна [2–4]. Микрофокусные полулинзы с фокусными расстояниями, меньшими 1 мм, позволяют получать пучки рентгеновского излучения с расходимостью на уровне критических углов полного внешнего отражения и плотностью порядка 10^{10} ph/(s · mm²) монохроматического излучения, например CuK_α, на основе обычных рентгеновских трубок без водяного охлаждения [2]. Но при этом площадь поперечного сечения таких пучков определяется выходным диаметром полулинзы, составляющим величину порядка миллиметра. Очевидно, такие размеры уже слишком велики для ряда приложений микроанализа, а установкой диафрагмы после такой системы, для получения требуемого размера пучка, мы значительно уменьшаем поток.

Существуют два пути уменьшения размера поперечного сечения и одновременно увеличения плотности потока излучения квазипараллельных микропучков. Первый путь — посредством усовершенствования оптического элемента, второй — рентгеновского источника. В нашем случае мы достигли результата с помощью комбинации обоих направлений. Новые возможности появились в связи с разработкой специальных микрофокусных рентгеновских источников, позволяющих предельно близко приближаться к фокусному пятну [4], а также в связи с разработкой технологии изготовления цилиндрических поликапиллярных структур с микронным диаметром канала [2].

Целью данной работы является экспериментальная демонстрация возможности получения квазипараллельных рентгеновских микропучков высокой интенсивности с использованием вышеупомянутых рентгеновской трубки и поликапиллярного оптического элемента.

Принцип описываемого метода состоит в следующем. Оптимизированная цилиндрическая поликапиллярная структура приближается максимально близко к фокусному пятну модифицированной для этих целей рентгеновской трубки. На выходе поликапиллярной системы получаем интенсивный квазипараллельный микропучок [5]. Оптическая схема эксперимента показана на рисунке, где d_0 — размер фокусного пятна рентгеновской трубки, f_{in} — фокусное расстояние (максимальное приближение к фокусному пятну), d_{in} — входной диаметр (диаметр „засветки“), d_{out} — выходной диаметр (диаметр выходного пучка). Данная оптическая схема позволяет получать пучки с диаметром поперечного сечения, определяемым размером эффективного фокусного

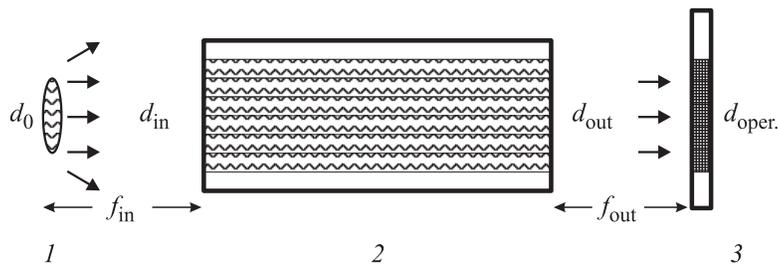


Схема формирования рентгеновского микропучка посредством поликапиллярной структуры: 1 — фокусное пятно, 2 — поликапиллярная структура, 3 — детектор.

пятна трубки и расстоянием между фокусным пятном и входным торцом поликапиллярной структуры: $d_{in} = d_{out} = d_0 + 2f\theta_c$, где θ_c — критический угол полного внешнего отражения от внутренних капиллярных стенок. По причине малости значений критических углов увеличение размеров выходного пучка в силу углового расхождения захватываемого поликапиллярной структурой пучка не велико. Так, для расстояния, достигнутого в нашем случае, $200\ \mu\text{m}$ и энергии излучения $8\ \text{keV}$ ($\theta_c \cong 4 \cdot 10^{-3}\ \text{mrad}$) соответствующее увеличение диаметра составляет всего $d_{incr} = 2\theta_c \cdot f_{in} = 2 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 200 = 1.6\ \mu\text{m}$. Рабочий размер пучка d_{oper} также определяется расхождением и расстоянием до объекта: $d_{oper} = d_{out} + 2\theta_c f_{out}$. Расходимость данных пучков находится на уровне двух критических углов полного внешнего отражения, а по некоторым данным [6] ввиду значительности вклада волновых свойств, при субмикрометровых размерах канала даже меньше.

За счет максимального приближения поликапиллярной структуры к источнику рентгеновского излучения, в качестве которого выступает в данном случае рентгеновская прострельная трубка, достигается увеличение плотности интенсивности на входе, диаметр пучка на выходе d_{out} при использовании цилиндрической прямостенной капиллярной структуры равен диаметру рабочей зоны поликапиллярной структуры (засвеченной части) на входе d_{in} , т. е. размеры пятна данной структурой передаются без изменения [5]. Прямостенная поликапиллярная структура имеет большую трансмиссию излучения, чем структура с изогнутыми каналами, как, например, полулинза. Таким образом, поликапиллярная цилиндрическая структура, так называемый столбик, с минимально

возможным размером канала на сегодняшний день является, возможно, одной из самых оптимальных структур для получения квазипараллельных микропучков высокой интенсивности за счет приближения к фокусному пятну.

Применяемый рентгеновский микрофокусный источник разработан и создан в институте рентгеновской оптики (ИРО). Данный источник оптимизирован для использования совместно с поликапиллярной оптикой. В составе источника используется рентгеновская прострельная трубка БС-11. Фокусирование электронного пучка осуществляется системой магнитных линз.

Толщина бериллиевого окна трубки приблизительно $200\ \mu\text{m}$. Конструктивно допускается возможность предельного приближения к аноду. Таким образом, возможна установка поликапиллярной структуры на расстоянии $f_{\text{in}} \approx 200\ \mu\text{m}$ от фокусного пятна трубки.

Применяемая поликапиллярная структура создана в ИРО. Длина столбика должна быть минимальной, необходимой лишь для осуществления малоугловой коллимации, т.е. для возможности осуществления нескольких отражений. Так, для столбика с диаметром капилляра $1\ \mu\text{m}$ на $1\ \text{mm}$ длины совершается уже 4 отражения излучения $\text{CuK}\alpha$, но работа с такими короткими столбиками крайне неудобна. Нами применялся столбик длиной $1\ \text{cm}$ с диаметром капилляра $2\ \mu\text{m}$ и диаметром всей сборки $2\ \text{mm}$.

В эксперименте использовалась трубка с медным анодом. Максимальная мощность для данной трубки, которую можно подавать без ущерба для целостности мишени, составляет $10\ \text{W}$. Установленное напряжение на трубке составляло $25\ \text{keV}$, ток — $10\ \mu\text{A}$. Измеренная интенсивность пучка на выходе структуры составила $3 \cdot 10^5\ \text{ph/s}$. Затем производилось измерение размеров пучка: ширина на полувысоте полученного пика интенсивности составила $20\ \mu\text{m}$. Данная трубка, что было предварительно проверено, имеет прямую зависимость от величины тока, поэтому полученное значение интенсивности экстраполировалось до мощности, приходящей на $1\ \text{W}$.

Рассчитанная из полученных данных плотность потока излучения составляет $10^9\ \text{ph}/(\text{s} \cdot \text{mm}^2)$ на $1\ \text{W}$ электронного пучка. При увеличении установочной мощности трубки до $10\ \text{W}$ получаем значение $10^{10}\ \text{ph}/(\text{s} \cdot \text{mm}^2)$, что соответствует плотности синхротронного источника. Например, синхротрон FOP (ESRF) дает плотность потока $5 \cdot 10^{10}\ \text{ph}/(\text{s} \cdot \text{mm}^2)$ в диапазоне $7\text{--}21\ \text{keV}$, а ANKA (г.Карслруе) $10^{12}\ \text{ph}/(\text{s} \cdot \text{mm}^2)$ в диапазоне $4\text{--}20\ \text{keV}$.

Таким образом, получены в условиях лаборатории микропучки с диаметром поперечного сечения порядка $10\ \mu\text{m}$ и плотностью потока излучения на уровне $10^{10}\ \text{ph}/(\text{s} \cdot \text{mm}^2)$. При этом использовалась обычная рентгеновская трубка с прострельным анодом и без водяного охлаждения. Несомненно, что посредством дополнительной оптимизации схемы и компонентов предложенного метода можно еще значительно увеличить плотность потока излучения в пучке и довести до значений $10^{12} - 10^{13}\ \text{ph}/(\text{s} \cdot \text{mm}^2)$.

Выражаем благодарность проф. М.А. Кумахову и О.В. Михину за ценные замечания.

Список литературы

- [1] *Dhez P., Chevallier P., Lucatorto T.B., Tarrío C.* // Review of Scientific Instruments. 1999. V. 70. N 4. P. 1907–1920.
- [2] *Kumakhov M.A.* // Proceedings of SPIE. 2002. V. 4765. P. 20–25.
- [3] *Романов А.Ю., Дмитриев И.В.* // Инженерная физика. 2004. № 1.
- [4] *Mikhin O.V., Kumakhov M.A., Ibraimov N.S., Gelever V.D.* // Proceedings of SPIE. 2002. V. 4765. P. 194–197.
- [5] *Романов А.Ю.* // Измерительная техника. 2004 (в печати).
- [6] *Sarpiscio G., Dabagov S.B.* // Proceedings of SPIE. 2002. V. 4765. P. 99–103.