

02

## Уменьшение полной расходимости рентгеновских поликапиллярных микропучков

© А.Ю. Романов

Институт рентгеновской оптики, Москва

E-mail: androm2@yandex.ru

Поступило в Редакцию 4 декабря 2007 г.

Экспериментально исследованы характеристики расходимости интенсивных квазипараллельных микропучков на выходе системы микрофокусный рентгеновский генератор/цилиндрическая поликапиллярная система методом сканирования пучка ножом. Обнаружен эффект уменьшения полной расходимости микропучка в области вблизи выходного торца поликапиллярной системы (квазиуменьшение расходимости).

PACS: 41.50.+h

В [1,2] получены интенсивные квазипараллельные рентгеновские микропучки с плотностью потока излучения, близкой к синхротронной на выходе системы микрофокусный рентгеновский генератор-цилиндрическая поликапиллярная система. В [3,4] рассматривается приложение данного способа получения микропучков к схеме сканирующей рентгеновской микроскопии на основе растровой рентгеновской системы. Для приложений важна информация об изменении размера микропучка с расстоянием, что характеризуется расходимостью. Расходимость поликапиллярных пучков обычно предполагается постоянной и в рамках геометрооптического рассмотрения равной, без учета потерь, двум критическим углам полного внешнего отражения (ПВО) рентгеновского излучения (РИ) от внутренних поликапиллярных стенок.

Расходимость после поликапиллярных структур принято подразделять на локальную и глобальную [5–8]. Локальная определяется расходимостью вследствие ПВО от стенок, глобальная же характеризует угол между осями монокапилляров.

Целесообразно ввести еще понятие полной или эффективной расходимости, характеризующей совокупный эффект и определяющей изме-

нение эффективного размера пучка. Под эффективным размером пучка понимается величина, определяющая основную область воздействия в данном сечении. Именно значение эффективной расходимости и будет давать метод сканирования пучка ножом в разных сечениях. Эффективным размером будем считать ширину на полувысоте гауссиана, аппроксимирующего экспериментальные данные, — дифференцированную кривую интенсивности при сканировании пучка ножом.

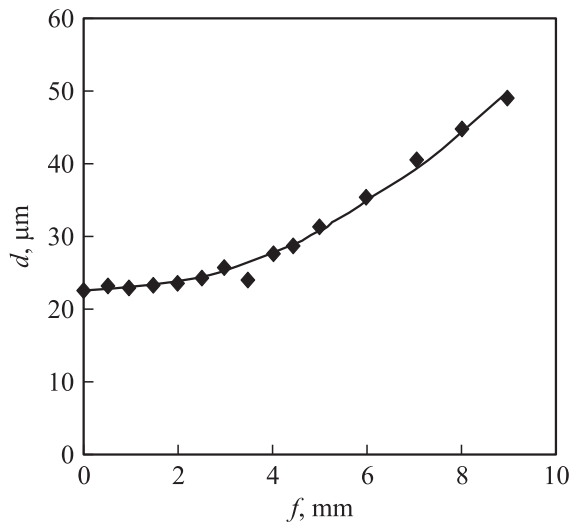
Детального рассмотрения характеристик полной расходимости поликапиллярных микропучков применяемым нами методом сканирования ножом [9,10] в литературе не обнаружено. Нами осуществлена попытка восполнить обозначенный пробел [11].

В нашей работе экспериментально получена зависимость диаметра сечения поликапиллярного микропучка от расстояния между местом сечения ножом и выходным торцом поликапиллярной структуры. Использованный поликапилляр имел диаметр канала  $2.5\ \mu\text{m}$ , общий диаметр поликапилляра —  $2.5\ \text{mm}$ . Длина поликапиллярной структуры —  $30\ \text{mm}$ . Применялся микрофокусный рентгеновский генератор на основе трубки БС-11, с медным анодом, в эксперименте использовалось характеристическое излучение  $\text{Cu } K_{\alpha}$ . Для сканирования пучка использовался танталовый нож.

Для определения размера пучка в интересующей точке оси снималась зависимость величины сигнала детектора от положения ножа при его поперечном сечении пучка. После чего полученная зависимость дифференцировалась и аппроксимировалась гауссианом, ширина которого на полувысоте и считалась размером пучка в данной точке.

Результаты представлены на рис. 1. Как видим, характер расходимости, равной тангенсу угла касательной к кривой, меняется. В области, близкой к торцу, наблюдается эффект уменьшения полной расходимости. Это вызвано характерным перераспределением поликапиллярной структурой поля излучения источника.

Как видно из графиков и как следует из общих соображений, значения диаметра в области вблизи к торцу отображают размер источника [12], что составляет значение  $\approx 23\ \mu\text{m}$ . На максимальную же расходимость, определяемую локальной расходимостью, т.е. обеспечиваемую углом многократного ПВО, микропучок, по-видимому, выходит на расстоянии  $F_{m.d.}$ , определяемом значением диаметра фокусного пятна трубки  $d_{f.s.}$  и максимальной расходимости  $Q_{\text{max}} \sim \vartheta$ , определяемой расходимостью пучка отдельного монокапилляра, пропорциональной



**Рис. 1.** Зависимость диаметра сечения пучка  $d$  на выходе поликапиллярного столбика от расстояния от выходного торца столбика  $f$ : ромбы — экспериментальные точки; сплошная линия — наилучшее приближение  $y = 0.351x^2 - 0.147x + 22.787$ ,  $R^2 = 0.9791$ .

критическому углу ПВО  $\vartheta$ :

$$F_{m.d.} \approx d_{f.s.}/Q_{\max}. \quad (1)$$

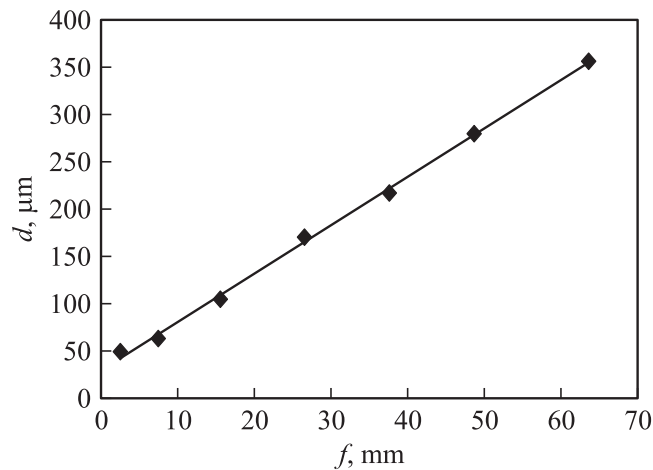
На полную расходимость поликапиллярный пучок выходит при выходе всех отдельных монокапиллярных пучков из поликапиллярного пучка, т. е. когда все скрытые монокапиллярные микропучки начинают участвовать в формировании расходимости поликапиллярного микропучка.

Отсюда диаметр поликапиллярного пучка  $d$  на расстоянии от выходного торца  $f$  будет определяться следующим выражением:

$$d \approx d_{f.s.} + Q_{\max}(f - F_{m.d.}). \quad (2)$$

А оценить размер фокусного пятна источника по размеру сечения пучка на выходе поликапиллярной системы соответственно можно как

$$d_{f.s.} \approx d - Q_{\max}(f - F_{m.d.}). \quad (3)$$



**Рис. 2.** Изменение диаметра поликапиллярного микропучка  $d$  на участке максимальной расходимости: ромбы — экспериментальные точки; сплошная линия — наилучшее приближение  $y = 5.0871x + 30.479$ ,  $R^2 = 0.9982$ .

Интересен ход экспериментальной кривой для полной расходимости после того, когда вообще перестает происходить добавка монокапиллярных пучков в общий, т.е. на расстоянии, превышающем  $2d_{f.s.}/Q_{\max}$  (рис. 2). Распределение интенсивности в сечении пучка в данном случае получено фотометодом, с использованием детектора на основе ПЗС-матрицы, математическая обработка экспериментальных данных использовалась прежняя. Как видим, далее  $2d_{f.s.}/Q_{\max}$  эффективная расходимость имеет постоянный характер и определяется примерно двумя критическими углами ПВО.

Также сходный эффект квазиуменьшения области захвата, вероятно, будет присутствовать и при наличии поликапиллярной структуры ограниченного размера, сопоставленной с пятном большего диаметра, что следует учитывать при оптимизации размера пятна.

На данный эффект необходимо обращать внимание при исследованиях расходимости поликапиллярных микропучков, при расчете значения диаметра пучка как при применении в микроанализе [1–4], так и для диагностики рентгеновских пятен [12].

По-видимому, именно ввиду этого эффекта в работе [13] возникли значительные трудности с определением расходимости полулинз методами получения изображения сечения пучка на различных расстояниях. Для полулинз в схеме увеличения эффект уменьшения полной расходимости в области вблизи выходного торца структуры будет более выраженным, чем для поликапиллярного столбика. Это вызвано как дополнительным уменьшением расходимости за счет кривизны полулинзы, так и увеличением полулинзой размера источника. И соответственно для полулинз в схеме уменьшения эффект уменьшения расходимости будет менее выраженным. Таким образом, для преобразующих размер источника поликапиллярных систем формула (1) преобразуется в

$$F_{m.d.} = (k d_{f.s.})/Q_{\max}, \quad (4)$$

где  $k$  — коэффициент преобразования (увеличения/уменьшения).

Данный эффект, по-видимому, не был обнаружен ранее из-за получения сечений преимущественно на значительных расстояниях и из-за того, что поликапиллярные микропучки не рассматривались ранее как отдельный вид квазипараллельных микропучков. С помощью поликапиллярной оптики Кумахова квазипараллельные микропучки получали посредством полулинз, где этот эффект трудно обнаружить.

Абсолютные значения, а также, по-видимому, и ход кривой зависимости размера пучка от расстояния от выходного торца структуры будет зависеть от способа определения эффективного размера, что было показано в [8]. В этой работе для пучка после диафрагмы приведены кривые зависимости размера пучка от расстояния от диафрагмы. Причем размер пучка определялся следующими способами: ширина на полувысоте, ширина на полувысоте аппроксимирующего гауссиана и ширина площади 90% интенсивности. Характер кривых несколько различается по абсолютной величине и скорости роста с расстоянием.

Целесообразно провести дальнейшие исследования данного эффекта по зависимости от размера фокусного пятна, длины поликапилляра, размера монокапилляра, проанализировать изменение при различных вариантах оценки размера пучка, что может дать различные характеристики расходимости [8], а также попытаться описать аналитически кривую эффективного размера пучка в зависимости от расстояния от торца поликапилляра.

## Список литературы

- [1] Романов А.Ю., Дмитриев И.В. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 18. С. 65–69.
- [2] Романов А.Ю., Дмитриев И.В. // Поверхность. 2005. № 8. С. 32–34.
- [3] Гелевер В.Д., Романов А.Ю. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 5. С. 52–57.
- [4] Gelever V.D., Romanov A.Yu. // Proceedings of SPIE. 2005. V. 5943. P. 313.
- [5] MacDonald C.A. // Journal of X-ray Science and Technology. 1996. V. 6. P. 32–47.
- [6] Chen Z.W., Youngman R., Bievenue T. et al. // Proceedings of SPIE. 1999. V. 3767. P. 52–58.
- [7] Gibson W.M., MacDonald C.A., Ulrich J.B. // Proceedings of SPIE. 1999. V. 3767. P. 199–208.
- [8] Huang H., Gibson W., Ponomarev I., Youngman R. // Proceedings of SPIE. 2002. V. 4781. P. 112–118.
- [9] Романов А.Ю., Дмитриев И.В., Акулов А.Ю. // Поверхность. 2005. № 2. С. 17–22.
- [10] Романов А.Ю. // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. № 1. С. 34–39.
- [11] Романов А.Ю. // Материалы симпозиума „Нанопизика и нанопэлектроника“. Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2006. С. 40–43.
- [12] Романов А.Ю. // Измерительная техника. 2004. № 7. С. 20–22.
- [13] Nikitina S.V., Scherbakov A.S., Nikitin A.N. // Proceedings of SPIE. 1995. V. 2519. P. 179–185.